

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Návrh měřicího pracoviště pro měření  
teplotního pole v asynchronním elektromotoru**

**The design of a workplace for  
an induction motor temperature field measurement**

Studijní program: N 2612 Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Mechatronika

Pracoviště: Ústav mechatroniky a technické informatiky

Fakulta mechatroniky, informatiky  
a mezioborových studií

Technická univerzita v Liberci  
Studentská 2, 461 17 LIBEREC 1

Autor: Zdeněk Mizera

Vedoucí diplomové práce: Ing. Leoš Beran, Ph.D.

Konzultant: Ing. Jiří Kubín, Ph.D.

Rozsah diplomové práce

Počet stran: 66  
Počet příloh: 2  
Počet obrázků: 34  
Počet tabulek: 7



# Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo). Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce a prohlašuji, že souhlasím s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem Technické univerzity v Liberci, která má právo požadovat ode mne přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci 15. 5. 2009

.....

Zdeněk Mizera

# Poděkování

Rád bych tímto upřímně poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Leoši Beranovi, Ph. D. za velmi pečlivé vedení a odbornou kontrolu v celém průběhu tvorby této práce.

# Abstrakt

## Návrh měřicího pracoviště pro měření teplotního pole v asynchronním elektromotoru

Zdeněk Mizera

Cílem práce je návrh a realizace pracoviště pro měření teplotního pole uvnitř i vně AM. Měřením teploty statorového vinutí je možné včas detekovat blížící se chybový stav. Tento způsob diagnostiky předpokládá, že existuje použitelný vztah mezi vnitřní a vnější teplotou. Lokálně zvýšená vnitřní teplota je zapříčiněná především zkratem ve vinutí a působí degradaci izolace vodičů. Tím se výrazně zkracuje životnost stroje a snižuje spolehlivost.

Vyvinutý elektromotor (Siemens Elektromotory s.r.o. [4]) je doplněn ve statorovém vinutí o 24 vhodně rozmístěných termočlánků. Dalších 12 termočlánků je umístěno na povrchu statoru elektromotoru. Ze statorového vinutí jsou vyvedeny 2 až 4 odbočky v každé fázi, což slouží k simulaci zkratu ve vinutí. Pro snímání dat je vytvořena aplikace s grafickým uživatelským rozhraním v prostředí Matlab. Použité prostředí zajistí snadné zpracování dat jak při měření, tak i při vyhodnocení. Měření několika desítek teplot je realizováno pomocí multiplexovací karty, měřicí ústředny a PC. Vše propojuje sběrnice GPIB. Dále jsou měřeny odebírané proudy jednotlivými fázemi elektromotoru a také proud zkratovanou částí vinutí.

Průběžná diagnostika zvyšuje spolehlivost elektromotorů a především jejich nadřazených celků a výrobní linky jako takové.

**Klíčová slova:** elektromotor, teplotní pole, měření

# Abstract

## **The design of a workplace for an induction motor temperature field measurement**

Zdeněk Mizera

The design and realization of a workplace for an induction motor temperature field measurement is the aim of this thesis. The stator temperature measurement enables the detection of an upcoming fault state. This way of diagnostic approach supposes that a relation between internal and external temperature exists. Locally elevated temperature is primarily caused by a short circuit inside the winding and leads to the degradation of conductors insulation. The device's lifetime and its reliability is reduced then.

24 thermocouples are attached to an induction motor (Siemens [4]) in appropriate positions inside the stator winding. Furthermore, 12 additional thermocouples are placed on the external surface. There are 2 to 4 coil taps per phase in the stator winding. They are exploited for a simulation of a short circuit in the winding. An application with graphical user interface was developed in Matlab for the data scanning. This environment provides an easy measurement control and data evaluation. The measurement of several tens of temperatures is realized through a multiplexing card, a data acquisition switch unit and a PC. All components are linked by the GPIB bus. In addition, phase currents and short circuit current are measured.

The continuous diagnostics improves the reliability of induction motors, and in particular, superordinate units and the whole production lines.

**Keywords:** induction motor, field of temperature, measurement

# Obsah

<b>Prohlášení</b>	<b>3</b>
<b>Poděkování</b>	<b>4</b>
<b>Abstrakt</b>	<b>5</b>
<b>Abstract</b>	<b>6</b>
<b>Obsah</b>	<b>8</b>
<b>Seznam zkratk a symbolů</b>	<b>9</b>
<b>Úvod</b>	<b>10</b>
<b>1 Asynchronní elektromotor</b>	<b>12</b>
1.1 Chlazení	12
1.1.1 Trvalé zatížení a krátkodobý chod	13
1.1.2 Přechodový jev	17
1.2 Mechanické poruchy	18
1.3 Elektrické poruchy	19
1.4 Zkrat ve vinutí	20
1.4.1 Materiálové vady	20
1.4.2 Výrobní vady	21
1.4.3 Vady vlivem okolního prostředí	21
1.4.4 Tepelné účinky zkratového proudu	21
<b>2 Diagnostika asynchronního elektromotoru</b>	<b>23</b>
2.1 Dělení a principy diagnostiky	23
2.1.1 Získání diagnostických příznaků	24
2.1.2 Vyhodnocení diagnostických příznaků	24
2.2 Offline diagnostika	25
2.3 Online diagnostika	25
<b>3 Pracoviště</b>	<b>26</b>
3.1 Volba vybavení a způsobu ovládání	26
3.2 Měřicí ústředna Agilent 34970A a měřicí karty 34901A	26
3.3 Elektromotor	28
3.4 Termočlánky	28
3.5 Ostatní přístroje a zařízení	29
3.5.1 Analyzátor Norma 5000 a proudové sondy HAMEG HZ56	30
3.5.2 Synchronní generátor MEZ	30



3.6	Blokové zapojení . . . . .	31
<b>4</b>	<b>Grafické uživatelské rozhraní v prostředí Matlab</b>	<b>33</b>
4.1	Uživatelské rozhraní . . . . .	33
4.2	Grafický průvodce GUIDE . . . . .	34
4.3	Tvorba GUI v prostředí Matlab manuálně . . . . .	34
4.4	Parametry objektů . . . . .	36
4.4.1	Poloha . . . . .	36
4.4.2	Označení . . . . .	36
4.4.3	Typ prvku . . . . .	36
4.4.4	Textová Popiska . . . . .	37
4.5	Realizace GUI ve formě funkce . . . . .	37
<b>5</b>	<b>Aplikace IMTfield</b>	<b>39</b>
5.1	Požadavky, výhody a popis . . . . .	39
5.2	„Uživatelský manuál“ . . . . .	40
5.2.1	Základní práce s aplikací . . . . .	40
5.2.2	Ukládání a načítání dat . . . . .	42
5.2.3	Start měření . . . . .	43
5.2.4	Vykreslení dat do grafu . . . . .	43
5.3	Programová struktura aplikace IMTfield . . . . .	44
5.3.1	Přístup k řešení . . . . .	44
5.3.2	Uložení a otevření nastavení aplikace . . . . .	45
5.3.3	Uložení a otevření naměřených dat . . . . .	46
5.3.4	Nastavení měřených kanálů Phase Set . . . . .	46
5.3.5	Nastavení komunikace GPIB . . . . .	46
5.3.6	Kontrola vložených údajů uživatelem . . . . .	47
5.3.7	Graf naměřených hodnot . . . . .	47
5.3.8	Spuštění a zastavení měření . . . . .	48
5.3.9	Hlavní měřicí smyčka . . . . .	48
<b>6</b>	<b>Měření teplotního pole AM</b>	<b>51</b>
6.1	Naměřené hodnoty . . . . .	51
6.2	Zhodnocení . . . . .	51
	<b>Závěr</b>	<b>53</b>
	<b>Literatura</b>	<b>55</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>57</b>
	<b>A. Fotografie poruch elektromotorů a pracoviště</b>	<b>57</b>
	<b>B. Naměřené hodnoty</b>	<b>63</b>

# Seznam zkratek a symbolů

AM	asynchronní elektromotor
CE	Central European
ČSN	Československé normy
EN	Evropské normy
FM	frekvenční měnič
GPIB	General Purpose Interface Bus
GUI	Graphical User Interface/Grafické uživatelské rozhraní
GUIDE	Graphical User Interface Design Environment
HPIB	Hewlett Packard Interface Bus
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MS	Microsoft
PC	personal computer/osobní počítač
PTC	termistor – pozistor
RMS	Root mean square
RS-232	komunikační rozhraní
RTD	Resistance temperature detector/odporový teploměr
SBP	Switched Board Programming/Metoda přepínání prostředí
SCPI	Standard Commands for Programmable Instruments/Standardní příkazy pro programovatelné přístroje
SG	synchronní generátor
TC	Thermocouple/termočlánek
TCM	Thermal Capacity Memory
TTL	Transistor-Transistor-Logic/tranzistorově tranzistorová logika
USB	Universal Serial Bus/Univerzální sériová sběrnice
VISA	Virtual Instrument Software Architecture/Architektura virtuálních nástrojů

# Úvod

V této diplomové práci se realizuje pracoviště pro ověření online diagnostiky elektromotoru pomocí termočlánků.

Asynchronní elektromotor s kotvou nakrátko je v průmyslu velice rozšířený elektrický stroj. Slouží jako základní prvek k přeměně elektrické energie na mechanickou. Jeho význam v posledních dvou desetiletích ještě vzrostl použitím frekvenčních měničů, které umožnily snadné řízení rychlosti. Spolehlivost těchto zařízení je na vysoké úrovni, protože jejich vývoj probíhá velmi dlouho. Riziko selhání však nikdy nebude nulové. Častou příčinou havárie je zkrat ve vinutí z důvodu stárnoucí izolace vinutí. Tento jev působí jako lavina, zkratem vzniká tepelná energie, která vinutí ještě více poškozuje. Elektromotor tím také ztrácí na výkonu a zákonitě musí být přetěžován až do samotného shoření. Pořizovací náklady jsou sice nízké, avšak díky rozmanitosti typů se nevyplatí udržovat další stroje v záloze. Bylo by jich mnoho, což je pro průmyslový podnik neúnosné. V současné době se často využívá jako tepelná ochrana termistor, které zajistí vypnutí elektromotoru. Jejich funkce je však v náročném provozu nedostatečná. Běžné jistící členy jako jsou pojistky a jističe menší zkraty vůbec nedetekují.

Online diagnostika zajistí sledování elektromotoru a včasné varování před blížícím se selháním. Tím by bylo možné ušetřit značné prostředky. Nečekané výpadky výrobní linky se mohou značně prodražit i díky smluvním sankcím za prodlení.

Výrobci dnes dodávají elektromotory s možností ochrany termistory PTC například firma Moeller [15], případně firma ABB systém TCM [6], nejde o standardní výbavu. Užitím frekvenčních měničů vyvstává otázka, zda tento přístroj nezajistí ochranu podřazeného prvku – elektromotoru. Nepřímým důsledkem použití FM je také zesílená izolace, což by mohlo vést ke zvýšení spolehlivosti. Měnič samozřejmě obsahuje ochranu proti přetížení, ale především sama sebe. Drobné zkraty opět není schopen zachytit a diagnostikovat, alespoň zatím takovou funkci výrobci nenabízí.

Budoucím výsledkem by mohl být jednoduchý a finančně dostupný diagnostický systém. Ten by se skládal z několika termočlánků umístěných výhradně vně statoru elektromotoru a mikropočítače sledující jejich stav. K tomu je však nejprve nutné ověřit, jakým způsobem dochází k přenosu tepla z vinutí na stator, vliv zkratu na vinutí a především připravit prostředky pro vývoj této metody.

Práce je rozdělena na šest částí. Po úvodní kapitole je v následných částech rozebírána problematika chlazení, poruchy a diagnostika elektromotorů. Další části se zabývají pracovištěm a měřicí aplikací. Šestá část se zabývá získáváním dat a jejich vyhodnocením. Vše zastřešuje poslední část – závěr.

# 1 Asynchronní elektromotor

Zde bude uveden AM z hlediska aspektů spojených s touto prací. Jednak to je chlazení, s kterými úzce souvisí i ohřev elektromotoru. Dále je uveden přehled poruch, které tento ohřev mohou způsobit. Jde především o elektrické poruchy, ale zmíněny jsou pro komplexnost i mechanické. Zvláštní pozornost je věnována zkratu ve vinutí v poslední podkapitole.

## 1.1 Chlazení

Jako u většiny zařízení dochází i při provozu asynchronního elektromotoru k oteplení vlivem ztrát. Tam kde ztráty vznikají dochází k největšímu oteplení. Pro návrh se počítá dle [1] s oteplením vodičů způsobené Jouleovými ztrátami a oteplením železa díky ztrátám v železe. Vliv má i průběh zatěžování stroje. Technická norma ČSN EN 60034-11 (35 0000) [2] uvádí různé typy zatěžovacích charakteristik  $S_x$ . Jejich souhrn je uveden v tabulce 1.1.

Tab. 1.1: Zatěžovací charakteristiky stroje [2]

Označení	Popis
S1	trvalé zatížení
S2	krátkodobý chod
S3	přerušovaný chod
S4	přerušovaný chod s rozběhem
S5	přerušovaný chod s rozběhem a elektrickým brzděním
S6	přerušované zatížení
S7	přerušované zatížení s rozběhem a elektrickým brzděním
S8	přerušování zatížení se změnou otáček

Oteplením  $\Delta\vartheta$  je rozuměn rozdíl mezi ohříváním předmětem a okolím [1], tak jak uvádí rovnice 1.1.

$$\Delta\vartheta = \vartheta_t - \vartheta_0 \text{ [}^\circ\text{C}; ^\circ\text{C}, ^\circ\text{C}] \quad (1.1)$$

Oteplení je nutné zahrnout již do návrhu jak stroje samotného, tak i následně pohonu. Předimenzování by dle [3] vedlo na snížení účinnosti, naroste hmotnost i cena a především poklesne v průmyslu sledovaný účinek. Naopak poddimenzovaný stroj se přetěžuje a tedy i nadměrně ohřívá, což má negativní vliv na izolaci. Skriptum [3] uvádí, že překročením dovolené teploty o 10 % stárne izolace  $2\times$  rychleji.

Ztráty v železe se podle [3] odvádějí přes výrazně menší tepelný odpor než ztráty ve vinutí. Ložiska se chladí ložiskovými štíty, proto jsou pro asynchronní motor nejpodstatnější ztráty ve statorovém vinutí, rotor dovoluje vyšší oteplení. Tabulka 1.2 uvádí dovolené oteplení dle normy ČSN EN 60034-11 (35 0000) [2].

Tab. 1.2: Dovolené oteplení stroje [2]

Teplotní třída	Oteplení statoru [°C]	Oteplení rotoru [°C]
A	60 ÷ 65	60
E	75	75
B	80 ÷ 85	80
F	100 ÷ 110	105
H	125 ÷ 130	125

### 1.1.1 Trvalé zatížení a krátkodobý chod

Autor v [1] uvádí, že pokud by bylo ohřívání těleso dokonale tepelně izolované, tak by veškeré vzniklé ztráty spotřebovalo na zvětšení tepelného obsahu a při trvalé konstantních ztrátách by se teplota tělesa rovnoměrně zvyšovala. Žádný běžně používaný elektromotor není dokonale tepelně izolován, je totiž obklopen prostředím, které ho chladí. V případě asynchronního elektromotoru s kotvou nakrátko je chladičem obvykle okolní vzduch s nižší teplotou, který působí ochlazení stroje.

Jak teplo přestupuje do chladičského prostředí je dáno styčnou plochou povrchu s chladičem, vlastnostmi prostředí a tepelným spádem. Teplo přestupuje na počátku méně, více se spotřebovává na zvětšení tepelného obsahu a dochází k rychlejšímu

vzestupu teploty. Po jistém nárůstu oteplení se přestup tepla zlepšuje. Větší část tepla se odevzdá prostředí a menší působí na ohřev stroje, což znamená, že čím je větší oteplení, tím teplota stroje stoupá pomaleji. Za určitou dobu oteplování je tak dosaženo rovnovážného stavu, protože veškeré teplo vzniklé v zařízení se odevzdá do okolí, teplota tělesa již nestoupá. Rovnice 1.2 [1] popisuje tento ustálený stav

$$\Delta P dt = \alpha S \Delta \vartheta dt, \quad (1.2)$$

kde  $\Delta P$  jsou ztráty,

$S$  je chladicí povrch tělesa,

$\Delta \vartheta$  je oteplení povrchu tělesa proti prostředí,

$\alpha$  je součinitel přestupu tepla.

Slovně jde tato rovnice dle [1] popsat následujícím způsobem: „ztracená energie = množství odevzdaného tepla do prostředí“.

Přenos tepla do vzduchu je realizován sáláním, vedením a prouděním. Vzduch je špatný vodič tepla, proto se vedení příliš neuplatňuje a vždy se uvažuje dohromady s prouděním. K proudění dochází je-li vzduch zahřátý, poté stoupá nahoru a na jeho místo se tlačí zespodu chladnější, který je potom ve styku s chladicí plochou. V [1] jsou uvedeny tyto základní vztahy pro součinitele přestupu tepla pro popis výše uvedených dějů:

pro proudění a vedení (přirozená konvekce)

$$\alpha_p = 6,5 + 0,05\Delta\vartheta [WK^{-1}m^{-2}; K], \quad (1.3)$$

pro samotné sálání

$$\alpha_s = 4,8 + 0,03\Delta\vartheta [WK^{-1}m^{-2}; K], \quad (1.4)$$

společný součinitel je tedy

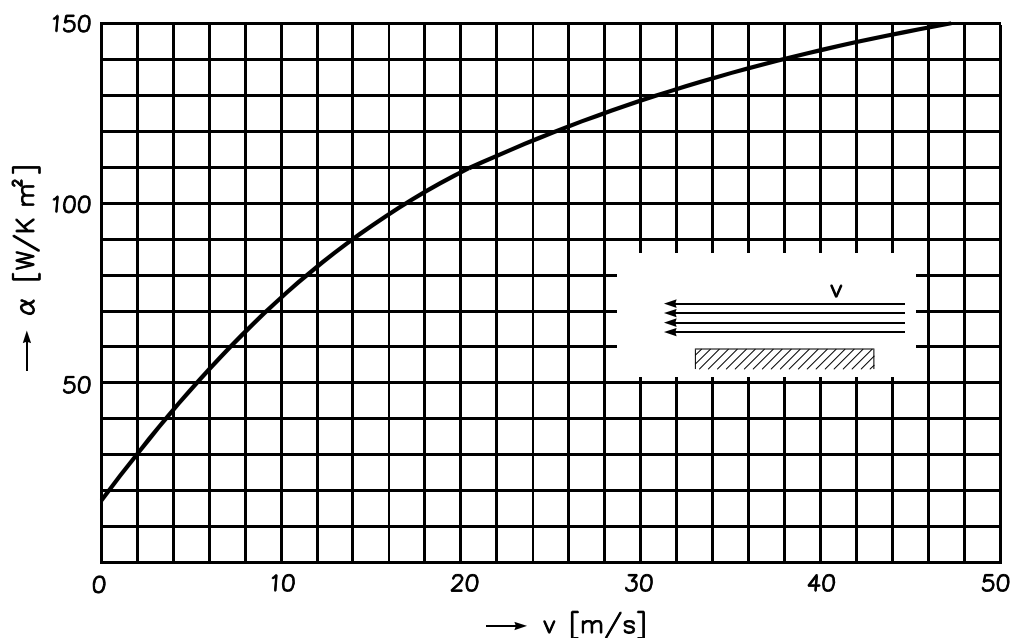
$$\alpha = \alpha_p + \alpha_s = 11,3 + 0,08\Delta\vartheta [WK^{-1}m^{-2}; K]. \quad (1.5)$$

Podmínkou pro použití společného součinitele  $\alpha$  je, že společná ochlazovací plocha je volně vystavena chladicímu vzduchu a uplatňují se všechny tři způsoby přenosu tepla.

Speciálními případy jsou dle [1] dráty, kanály, žebrované plochy a chlazení proudem vzduchu.

### a) Dráty

Teplu je lépe odváděno z povrchu drátů než z rovinné plochy při stejné ploše a to z toho důvodu, že na něj připadá větší množství vzduchu. Pro konkrétní případ oteplení 25 až 100 K a drátu s průměrem do 10 mm je na obr. 1.1 uveden průběh součinitele přestupu tepla.



Obr. 1.1: Součinitel přestupu tepla [1]

### b) Kanály

Pro stěny se uplatňuje pouze proudění. Minimální šířky uvádí [1] následně:

ve vzduchu 8 mm, pokud chladí jediná stěna,

16 mm, pro případ chlazení oběma stěnami.

### c) Žebrované plochy

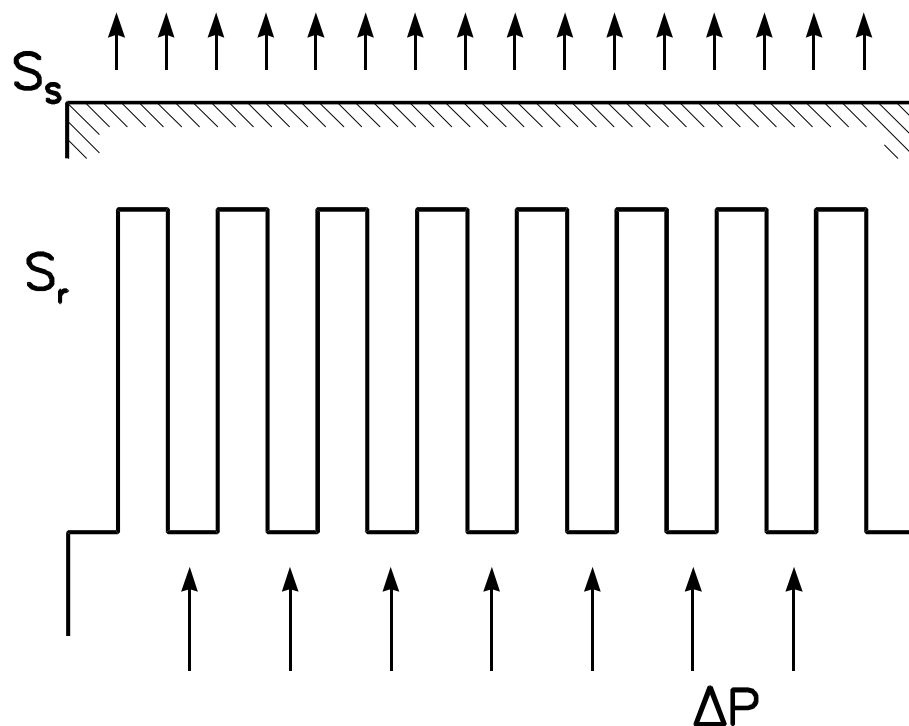
Zde se dle [1] uplatňuje předávání tepla sáláním a prouděním v kolmém průmětu žebrované plochy  $S_S$ , což ukazuje obrázek 1.2, pro stěny jde pouze o proudění.

Pak platí

$$\Delta P = (S_S \alpha + S_r \alpha_p) \Delta \vartheta \text{ [W; m}^2, \text{WK}^{-1} \text{m}^{-2}, \text{K}], \quad (1.6)$$

kde  $S_r$  je povrch chladicích žeber.





Obr. 1.2: Chlazení žebrovanými plochami [1]

#### d) Chlazení proudem vzduchu

Podstatného zlepšení chlazení, lze dosáhnout nuceným prouděním vzduchu – aktivní chlazení. To názorně ilustruje obrázek 1.3, kde je uveden příklad součinitele přestupu tepla pro vodiče do průměru 10 mm při oteplení 25 až 100 K. Ten lze využít k určení oteplení v točivých elektrických strojích, kdy za rychlost chladicího vzduchu se bere dle [1] 40 % obvodové rychlosti ventilátoru.

Množství vzduchu k odvedení ztrát je pak:

$$Q = \frac{\Delta P}{c_p \cdot \Delta \vartheta} = 0,82 \frac{\Delta P}{\Delta \vartheta} [m^3 s^{-1}; kW, K], \quad (1.7)$$

kde  $\Delta P$  jsou celkové ztráty ve stroji,

$\Delta \vartheta$  je oteplení vzduchu při průchodu strojem, max. 20 K,

$c_p$  je měrné teplo vzduchu za stálého tlaku ( $1,228 kJ K^{-1} m^{-3}$ ).

Krátkodobým chodem je rozuměn provoz se zátěží a následně trvale bez zátěže naprázdno. Pro velmi krátký chod stroje lze dle [1] přestup tepla do prostředí zanedbat a uvažovat pouze zvětšování tepelného obsahu tělesa, proto předpokládáme, že veškeré ztráty jdou na zvýšení teploty stroje.

Pro velmi krátký chod pak platí:

$$\Delta Pt = cV\Delta\vartheta \text{ [W, s; JK}^{-1}\text{m}^{-3}, \text{m}^3, \text{K}], \quad (1.8)$$

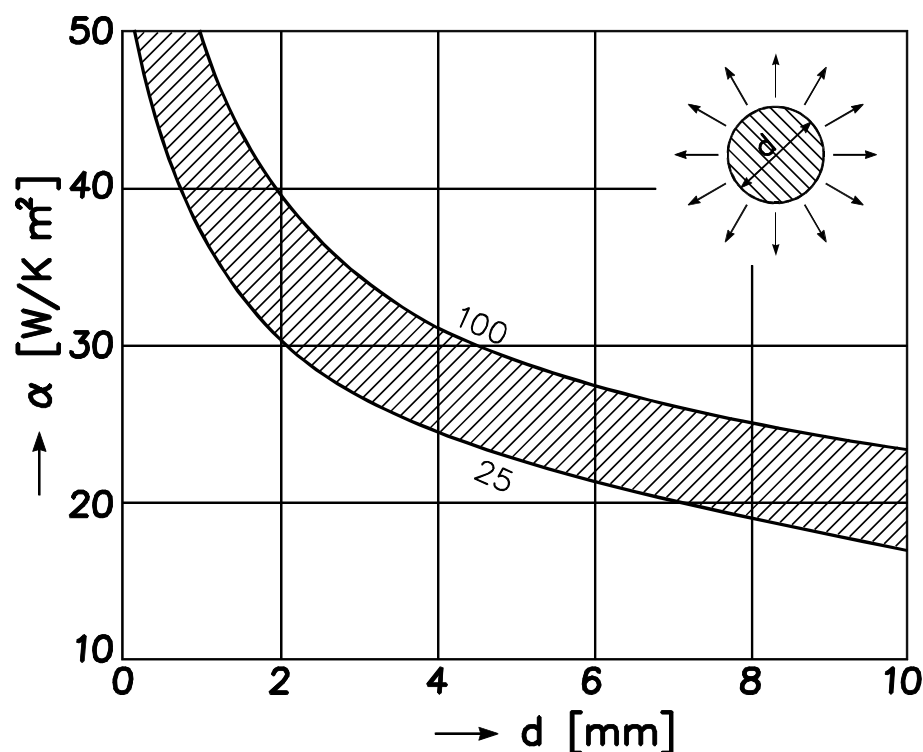
kde  $\Delta P$  jsou ztráty,

$t$  je doba vzniku ztrát,

$V$  je objem,

$\Delta\vartheta$  je oteplení,

$c$  je měrné teplo.



Obr. 1.3: Součinitel přestupu tepla v proudícím vzduchu [1]

### 1.1.2 Přechodový jev

Pro dimenzování se podle [3] elektromotor považuje za homogenní těleso. Pro odvod tepla je určující konstrukce stroje, materiál a rozdíl střední teploty stroje a okolí. Jak už bylo popsáno výše, lze teplo dělit na dvě části. Jedna zvyšuje oteplení stroje  $\Delta\vartheta$  a druhá se odvádí do okolí. Stav lze popsat celkovou tepelnou kapacitou stroje  $C \text{ [JK}^{-1}\text{]}$ , což je součin hmotnosti  $m$  a měrné tepelné kapacity  $c$ . Dále náhradním součinitelem přestupu tepla do okolí  $A \text{ [WK}^{-1}\text{]}$ , který je určen součinem koeficientu přestupu tepla a ekvivalentní ochlazovací plochou  $S$ . Pak podle [3] platí:

$$\Delta P dt = C d(\Delta\vartheta) + A\Delta\vartheta dt \Rightarrow \frac{C}{A} \frac{d(\Delta\vartheta)}{dt} + \Delta\vartheta = \frac{\Delta P}{A}, \quad (1.9)$$

přičemž výraz

$$\frac{C}{A} = \frac{c \cdot m}{\alpha \cdot S} = \tau_{\vartheta} \quad (1.10)$$

udává tepelnou časovou konstantu,

$$\frac{\Delta P}{A} = \Delta\vartheta_{\infty} \quad (1.11)$$

ustálené oteplení. Při předpokladu, že stroj má na počátku oteplení  $\vartheta_0$  je řešení 1.9 uvedeno takto:

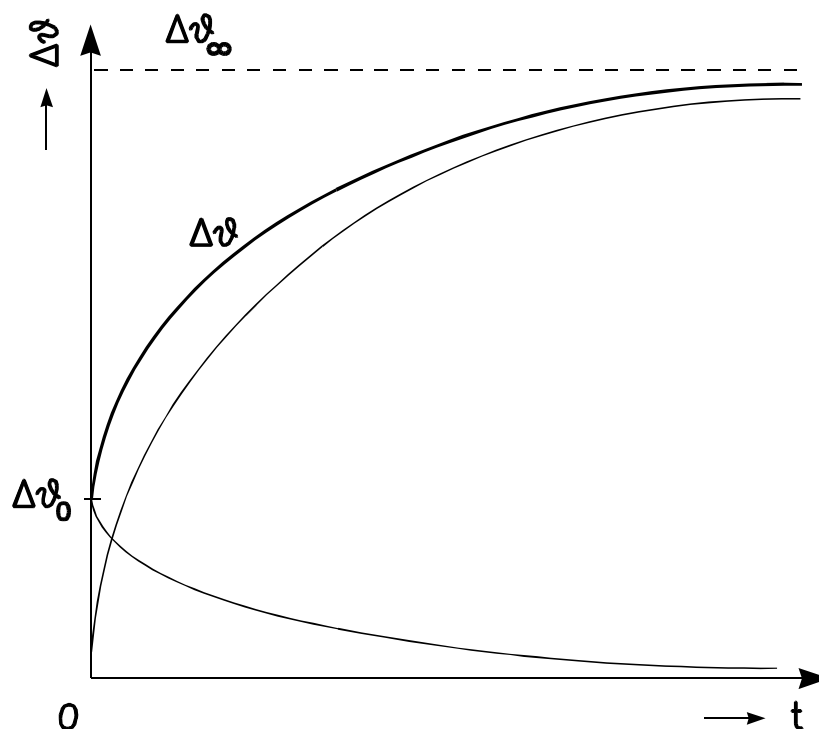
$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_0 e^{-\frac{t}{\tau_{\vartheta}}} + \Delta\vartheta_{\infty}(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\vartheta}}}). \quad (1.12)$$

Průběh by tak měl být exponenciální, měření na reálném stroji v poslední kapitole ovšem dokazují, že tomu tak není. Autor [3] to zdůvodňuje zavedením zjednodušujícího faktu, že elektromotor je homogenní těleso. Oteplovací křivka je proto odlišná než jak je uvedeno na obrázku 1.4. Zároveň je uvedena experimentální metoda pro určení tepelné časové konstanty – jde o průměr ze tří hodnot pro  $\tau_{\vartheta 1} : \Delta\vartheta_1 = 0$ ,  $\tau_{\vartheta 2} : \Delta\vartheta_2 = 0,5 \cdot \Delta\vartheta_{\infty}$  a  $\tau_{\vartheta 3} : \Delta\vartheta_3 = 0,8 \cdot \Delta\vartheta_{\infty}$ .

## 1.2 Mechanické poruchy

Elektromotor může z chodu vyřadit mnoho druhů mechanických poruch. Mezi ty nejobvyklejší patří poškození ložisek. Dle [5] jde prakticky o nesprávné provozování, ložiska způsobí přibližně 50 % poruch elektromotorů. Životnost ložisek je ovlivněna několika faktory. Stručný výpis uvádí také [5], jde o:

- vysoké otáčky – snižují životnost až o polovinu
- extrémní změny teploty případně překročení dovolené teploty
- kondenzace vody nebo přímo vniknutí kapaliny do elektromotoru
- nesprávné napnutí řemene a to jak přepnutí, tak i nedopnutí
- použití frekvenčních měničů působí mikroerozi ložiskových kuliček, kluzných cest a degradaci maziva



Obr. 1.4: Oteplovací charakteristika [3]

- vibrace (nevyvážení zátěže, nesouosost hřídele rotoru a zátěže)

V malých asynchronních elektromotorech jsou použita kuličková ložiska, dle jednoho z renomovaných výrobců motorů [6] je jejich životnost v ideálním případě 30 000 až 40 000 hodin.

Další mechanickou poruchou může být dle [7] poškozený ložiskový štít, prohnutí hřídele, ukroucení hřídele či posunutí rotoru vůči statoru. Může též dojít k případu, kdy rotor dře o stator, viz fotografie v příloze A.

Mechanická porucha se následně projeví i v elektrických vlastnostech elektromotoru, dochází totiž obvykle k přetěžování stroje.

### 1.3 Elektrické poruchy

Poruchy elektrického typu můžeme rozdělit na rotorové, statorové a ostatní. Do kategorie ostatní lze zařadit vadnou svorkovnici, kdy mezi svorkami vznikne vodivé spojení, vadný kondenzátor i přepětí [7]. Porucha na kondenzátoru i přepětí vede v podstatě k poruše na statoru. Rotor elektromotoru s kotvou nakrátko je sice

masivní, ovšem může dojít k rozpojení či přerušení rotorových tyčí. Ovšem nejkomplikovanější poruchy vznikají na statoru s následnou výměnou celého statorového vinutí. Poměrně banální porucha na přívodu elektrické energie v podobě odpojení jedné ze tří fází může dospět ke spálení statorového vinutí elektromotoru následkem chodu na dvě fáze, viz fotografie v příloze A. Velice podobně k tomu může dojít i při použití vadných spínacích či jisticích prvků. Pak by teoreticky dle [8] neměly již žádné poruchy existovat. Autor [8] však dodává, že tomu není z důvodu nedokonalých materiálů. Je také nutno dodat, že ne vždy je elektromotor provozován dle podmínek výrobce (výkonová zátěž, teplota, vlhkost). Nedílnou součástí elektromotoru je izolace, ta není nikdy ideální a je citlivá na vlhkost. Proto vznikají další vady, jednak na izolaci samotného statorového vinutí, dále na drážkové izolaci a mezifázové izolaci. Následkem toho dochází k závitovým zkratům. Podle [7] to je nejčastější porucha AM, která vzniká přetěžováním vodičů a z důvodu skrytých vad materiálu. Ukázky takto poškozených vinutí jsou také v příloze A. Drážková izolace se může poškodit jednak proříznutím o dynamový plech, ale také již zmíněným navlhnutím. Podobně k tomu může dojít i vlivem zestárnutí impregnačního laku [7].

## **1.4 Zkrat ve vinutí**

Tento druh poruchy je simulován pomocí vytvořeného pracoviště, proto bude podrobně rozebrán v samotné podkapitole. V práci [8] jsou popsány různé faktory související se vznikem zkratu a jsou uvedeny níže.

### **1.4.1 Materiálové vady**

Jako první je zmíněný faktor mikroskopické vady materiálu – izolace. Tyto vady jsou sice lokálního charakteru, avšak mají zásadní vliv na chování izolace jako celku. Základní vlastnost materiálu – izolace – tak může být příměsí ovlivněna natolik, že se lokálně zvýší vodivost a poklesne elektrická pevnost. Autor [8] dále uvádí, že právě tato místa jsou namáhána jevem tzv. částečných výbojů a nutně musí dojít k jejich destrukci.

### 1.4.2 Výrobní vady

Vzhledem k tomu, že při výrobě elektromotoru dochází k mnoha operacím s jednotlivými částmi stroje, není možné zajistit bezchybnost výroby. Mimo výrobu jde ale i o údržbu stroje. Zde [8] jsou popisovány možné úkony. Zmíněno je poškrábání vodičů, k čemuž je však nutné vyvinout značnou sílu. Objevit se může i protržení drážkové či mezifázové izolace např. o již zmíněné dynamové plechy statoru. Problémem těchto drobných vad je, že výrobce je nemá šanci objevit. Projeví se tak až při využívání elektromotoru uživatelem.

### 1.4.3 Vady vlivem okolního prostředí

Tímto pojmem je v [8] míněno především teplo a vlhkost, dále radiační záření, působení chemických látek a jiné. Tyto aspekty způsobují rychlejší stárnutí polymerů, ze kterých bývají velmi často izolační materiály zhotoveny. Zároveň je zdůrazněno, že problematika zkoumání vlivu prostředí je velmi komplikovaná a zaobírá se jí mnoho vědeckých týmů po celém světě. V práci [8] jsou také uvedeny zajímavé pokusy. Jednak jde o test s lakem na vodič (smaltovaný vodič) a impregnačním lakem. Z porovnání vyplynulo, že impregnační lak je daleko více náchylnější na mechanické poškození po tepelném zatížení. Drážková izolace je náchylná po tepelném přetížení k destrukci a následnému zkratu vinutí na kostru, podobně tomu je s mezifázovou izolací. Tyto mechanické změny materiálů mají vliv i na elektrické vlastnosti [8]. Nakonec je zdůrazněn vliv přepětí na prvotní zkrat ve stroji a to v souvislosti s velmi často používanými frekvenčními měniči, který patrně převládá.

### 1.4.4 Tepelné účinky zkratového proudu

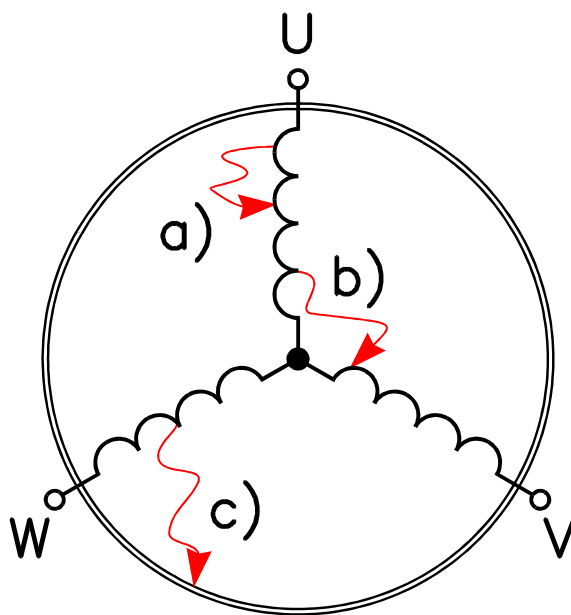
Účinky Lenz-Joulova tepla [8] způsobují destruktivní následky ve vinutí. V příloze jsou fotografie takto poškozených elektromotorů. Rovnice

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (1.13)$$

určuje okamžitou hodnotu činného výkonu při střídavém napájení. K výpočtu činného výkonu zkratu je vhodnější dle [8] vyjít ze znalosti protékajícího proudu a činného odporu vinutí a to podle rovnice 1.14.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T R \cdot i^2(t) dt \quad (1.14)$$

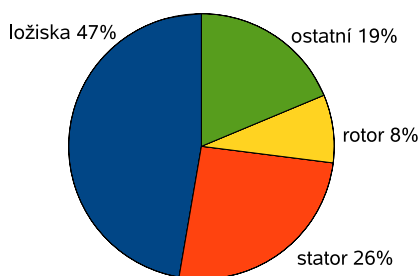
Uspořádání elektromotoru dává možnost vzniknout různým druhům zkratů dle obrázku 1.5.



Obr. 1.5: Různé druhy zkratu: a) mezizávitový, b) mezifázový, c) zkrat na kostru [8]

## 2 Diagnostika asynchronního elektromotoru

Asynchronní elektromotor je sice robustní a zároveň poměrně jednoduché zařízení, avšak jeho výpadek může způsobit značné potíže ve funkčnosti nadřazeného celku. Právě z tohoto důvodu je nutné přikročit k diagnostice – prověřování, která má za cíl včas odhalit nečekaná selhání. Nejde tedy primárně o to ochránit samotný stroj před poškozením, ale o varování před nastupující poruchou. Na základě včasné informace může uživatel provést patřičná opatření, např. provést výměnu či opravu stroje při nejbližší odstávce. Nejrozličnější poruchy elektromotoru byly uvedeny v předchozí kapitole, jejich statistické rozdělení uvádí [9] a je ilustrováno na obrázku 2.1. Od uvedených poruch se odvíjí i konkrétní způsoby diagnostiky.



Obr. 2.1: Podíly poruch elektromotoru [9]

### 2.1 Dělení a principy diagnostiky

K diagnostice elektromotoru lze přistupovat dvěma způsoby z hlediska zisku a zpracování dat. V prvním případě jde o tzv. offline diagnostiku. Tento způsob znamená, že diagnostika je prováděna mimo provoz stroje. Potřebná data se získají



měřením a až následně se zpracují a vyhodnotí zvlášť. Naopak online diagnostika se provádí za chodu elektromotoru i co se týče vyhodnocení. Práce [9] uvádí, že všechny diagnostické metody lze charakterizovat třemi společnými částmi. Nejprve je nutné provést měření a předzpracování signálu diagnostické veličiny pomocí snímačů sledované veličiny (teplota, napětí, vibrace atd.). Následuje generování diagnostických příznaků a vyhodnocení.

### **2.1.1 Získání diagnostických příznaků**

Příznaky lze určovat např. analýzou signálu. Autor [9] poukazuje na často používanou metodu souměrných složek. Transformace nesymetrické třífázové soustavy na soustavu tří souměrných složek (sousedné, zpětné a nulové) se používá k převedení měřeného proudu a napětí, kdy jsou souměrné složky následně vyhodnoceny v časové nebo frekvenční oblasti. Ke generování příznaků se využívá i principu tzv. Parkova vektoru, kde se sleduje, zda nedojde k narušení tvaru kruhového obrazce. Třetí uvedenou metodou je vyhodnocení frekvenčního spektra statorových napětí a proudů. Tyto tři uvedené metody jsou vhodné především k detekci poruch elektrických veličin. Dalším přístupem dle [9] je využití modelů, kdy se porovnávají data naměřená na reálném systému s daty získanými simulací na modelu. Ty pak lze rozdělit na analytické modely a znalostní modely. Heuristická informace v podobě zprávy od člověka např. hluk či zápach lze také použít ke generování příznaků.

### **2.1.2 Vyhodnocení diagnostických příznaků**

Na základě příznaků je nutné vyvodit závěr v podobě diagnózy. Používané metody dle [9] jsou jak ty nejzákladnější využívající prahové hodnoty, tak i pokročilé. Jako nejčastěji používané jsou uvedeny expertní systémy skládající se obvykle ze znalostní báze, řídicího mechanismu a báze dat. Z množiny cílových diagnóz určí, která diagnóza nejlépe odpovídá reálným datům. Operátor či technik často používá neúplné informace, k jejich vyhodnocení lze využít fuzzy logiky a na základě ní vytvořené klasifikátory. Pokud není známa vnitřní struktura a jsou známy pouze vztahy mezi vstupy a výstupy, je možné nasadit klasifikátory založené na neuronové síti. Tato metoda pracuje ve dvou stupních. V první fázi dochází k tzv. učení, až v druhé se vyhodnocuje. Jako poslední je uvedena [9] metoda založená na kauzálních sí-

tích. V případě elektromotoru zachycují vztah mezi příčinou, projevy a následky, a detekují tak prvotní příčiny poruchy.

## **2.2 Offline diagnostika**

Jak již bylo uvedeno, vyhodnocení offline diagnostikou není prováděno okamžitě, ale až po sběru dat. Navíc tento sběr dat neprobíhá neustále při chodu stroje, ale např. jen jednou týdně [9]. Tím je samozřejmě použitelnost této metody omezena na nekritické provozy [9]. Vzhledem k tomu, že ve vinutí statoru se zkrat může rozvíjet poměrně rychle, není offline metoda vhodná. Naopak je vhodná pro poruchy rotoru či ložisek [9]. K účelům offline diagnostiky existuje celá řada záznamníků dat od různých firem.

## **2.3 Online diagnostika**

Na rozdíl od offline metody je online diagnostika prováděna neustále, perioda měření tak není zmíněný týden, ale daleko kratší časový úsek. Provádí se jak sběr dat, tedy měření vhodných veličin, ale i jejich okamžité vyhodnocení. Článek [9] představuje tři přístupy. Jde o samostatné diagnostické zařízení, které je sice flexibilní, ale za cenu složitého nastavování a vyšších pořizovacích nákladů. Dalším přístupem je integrace několika senzorů přímo do elektromotoru uváděným pod názvem inteligentní motor. Takové zařízení uvedla např. firma Rockwell [9], která dovoluje snímat vibrace, teploty vinutí i fázové proudy a napětí. Konfigurování dle výrobce v podstatě odpadá. Důvodem proč se metoda nerozšířila je cena takového řešení. Elektromotory jsou dnes velice často napájeny pomocí frekvenčních měničů, to je další a poslední uváděná metoda online diagnostiky, která se nabízí jako ideální volba. Frekvenční měnič totiž snímá mnoho veličin a má i dostatek výpočetního výkonu k vyhodnocování dat. Autor [9] však uvádí, že použití FM je komplikované z důvodu rušení vznikající na výkonových prvcích, které negativně ovlivní potřebné veličiny pro diagnostiku, přesto má však budoucnost.

## 3 Pracoviště

Kapitola o pracovišti popíše použité přístroje a uvede jejich základní vlastnosti. Především volba vhodné měřicí ústředny byla důležitá pro bezproblémové snímání i zpracování velkého množství dat – teplot. Uveden je též speciální elektromotor, který není běžně vyráběn z důvodu blíže zmíněných specifik. Celá výsledná sestava je nakonec ilustrována na obrázku se zapojením.

### 3.1 Volba vybavení a způsobu ovládání

Od pracoviště se požaduje možnost měření teplot v řádu desítek měrných bodů. K takovému účelu lze využít měřicí ústřednu. Takové zařízení se běžně vyrábí buď jako komplet [10], kde stačí připojit měřicí čidlo nebo jako variabilní přístroj, do kterého je nutné vložit měřicí karty [11]. Druhá varianta je vzhledem k počtu měřených bodů pro toto pracoviště vhodnější. Ovládání by mělo být realizováno jednoduše a to pomocí PC. Měřicí přístroje lze obvykle řídit pomocí různých rozhraní, použitelné jsou např. RS-232, Ethernet či GPIB (HPIB, IEEE-488).

### 3.2 Měřicí ústředna Agilent 34970A a měřicí karty 34901A

Výše uvedeným požadavkům vyhovuje měřicí ústředna od firmy Agilent [11]. Přístroj samozřejmě umožňuje manuální ovládání, to je ovšem pro navrhované pracoviště nevhodné. K ovládání je použito GPIB rozhraní, které je dostatečně rychlé a lze jej poměrně snadno ovládat pomocí zvoleného software – Matlab. To ovšem není podmínkou, řídit tento přístroj lze i pomocí MS Excel, vlastní aplikací v jazyce C či přímo dodaným software Agilent BenchLink Data Logger [12].

Základní parametry Agilent 34970A [11]:

- 3 rozšiřující pozice pro vložení měřicích karet
- trvalá paměť na 50 000 naměřených hodnot
- datová rozhraní RS-232, GPIB
- 6 1/2 místný multimetr (22-bit)
- měří veličiny dle vložené karty (U, I, R,  $v$ , f)
- číslicové vstupy/výstupy dle vložené karty
- řídicí jazyk SCPI
- 4 alarmy (TTL, Hi, Lo)

Výhoda tkví především v kompaktnosti, díky třem rozšiřujícím pozicím. Do těch lze vložit měřicí karty různého typu, v současnosti je nabízeno 8 různých karet [11]. Pro měření elektromotor bylo potřeba 40 měřených bodů. Tomu přesně odpovídají 2 měřicí karty, neboli multiplexery typ 34901A [11].

Základní parametry Agilent 34901A [11]:

- 20 měřených kanálů
- rychlost přepínání až 60 kanálů/s
- měří: teplotu (termočlánek, termistor, RTD (2 a 4 vodičově)), napětí, proud,
  - odpor (2 a 4 vodičově), frekvence, perioda
- vstupní napětí až 300 V (DC, AC RMS)
- vstupní proud až 1 A (DC, AC RMS)
- vestavěný referenční bod pro měření s termočlánsky
- šířka pásma 10 MHz
- výkon 50 W

Tyto měřicí karty již obsahují referenční bod pro měření teploty pomocí termočlánků. Měření probíhá přepínáním mezi jednotlivými kanály. Z toho plyne, že měření neprobíhá v jednom okamžiku, to ovšem v našem případě není na závadu, rychlost tepelného děje u elektromotoru není obvykle nijak vysoká. Zvolený typ karet přepíná rychlostí až 60 kanálů/sekundu. Existuje i jiný typ, co dovoluje měřit i rychlostí až 250 kanálů/sekundu.

### 3.3 Elektromotor

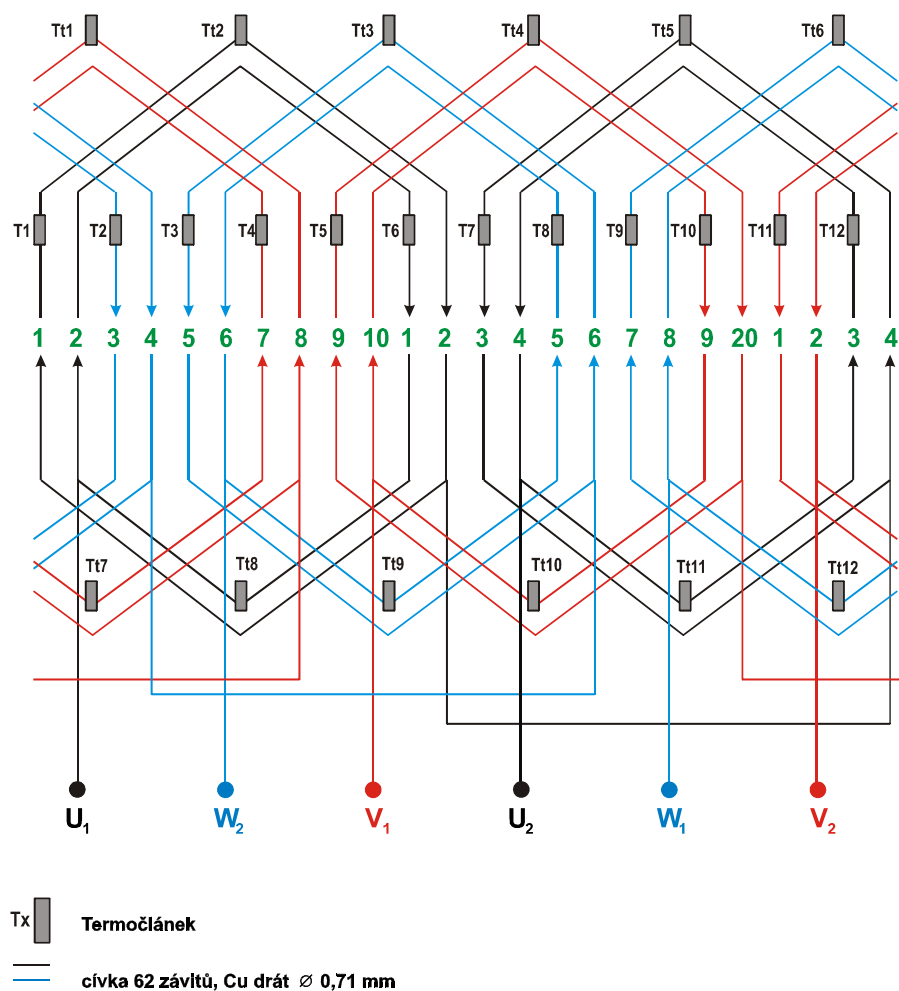
Použitý elektromotor s integrovanými termočlánky a odbočkami ve vinutí zachycují schémata na obrázcích 3.1, 3.2, 3.3 a tabulka 3.1 se štítkovými údaji. Na obrázku 3.1 je jednak schematické rozdělení cívek dle drážek a především umístění termočlánků do drážek (12 ks ozn.  $Tx$ ) a na čela vinutí (12 ks ozn.  $Ttx$ ). Obrázek 3.2 znázorňuje odbočky ve vinutí dle jednotlivých fází, které je možné propojit a tak simulovat zkrat ve vinutí. Jak jsou termočlánky umístěny vně AM je vidět na obrázku 3.3, kde je zjednodušený půdorys a nárys. Na patkách AM jsou 4 termočlánky s označením  $Tpx$  a vně statoru je 12 ks značených  $Tvx$ .

Tab. 3.1: Štítkové údaje elektromotoru

<b>Typ</b>	Siemens 1LA7090-2AA90-Z
<b>Výkon</b>	1,5 kW
<b>Napájení</b>	3f 50 Hz 230/400 V D/Y
<b>Odebíraný proud</b>	5,65/3,25 A
<b>Účinník</b>	0,85
<b>Otáčky</b>	2860 ot./min

### 3.4 Termočlánky

Měřit teplotu lze různými způsoby, měřicí karta zvládá jednak využití termistorů, ale také termočlánků. Termočlánky pracují na principu měření termoelektrického napětí, které vzniká na spoji dvou rozdílných kovů. Přehled typů termočlánků je uveden v tabulce 3.2. Rozsah měřených teplot je přibližně 20 °C až 300 °C. Tomu

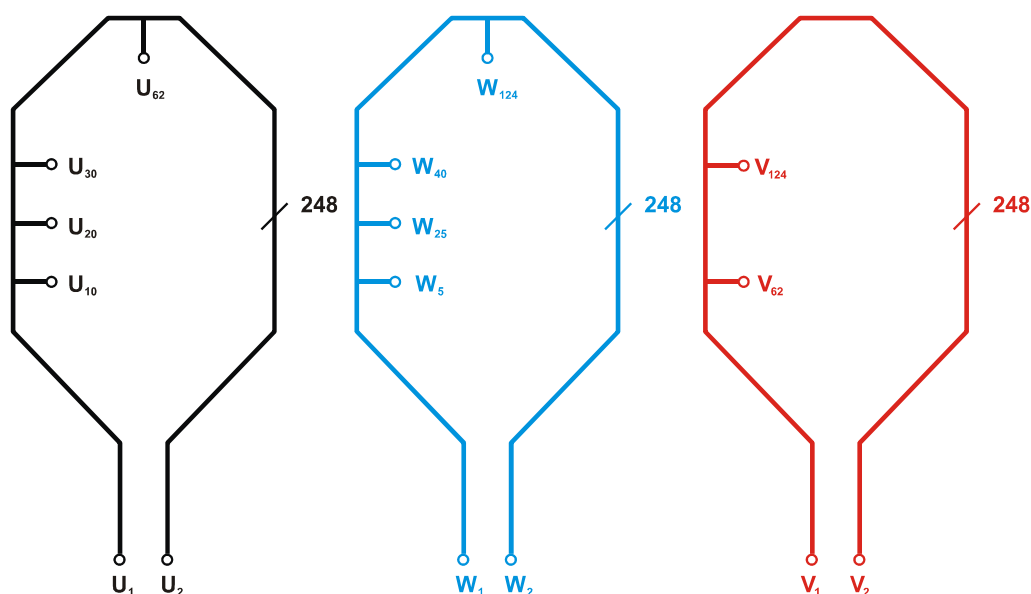


Obr. 3.1: Umístění termočláneků ve vinutí

vyhovuje více typů termočláneků avšak vzhledem k dostupnosti typu J byl použit právě tento typ. Dostatečnou přesnost měření pro dané pracoviště poskytují všechny termočláanky.

### 3.5 Ostatní přístroje a zařízení

Dále použité komponenty nejsou pro vytvořené pracoviště nezbytně nutné. Avšak především synchronní generátor je pro ověřování funkčnosti velice vhodný, stejně tak je ho možné nahradit frekvenčním měničem. Analyzátor od firmy LEM opět není potřeba a jeho volba nebyla striktní, avšak při měřeních je vhodné pro přehled měřit odebírané proudy.



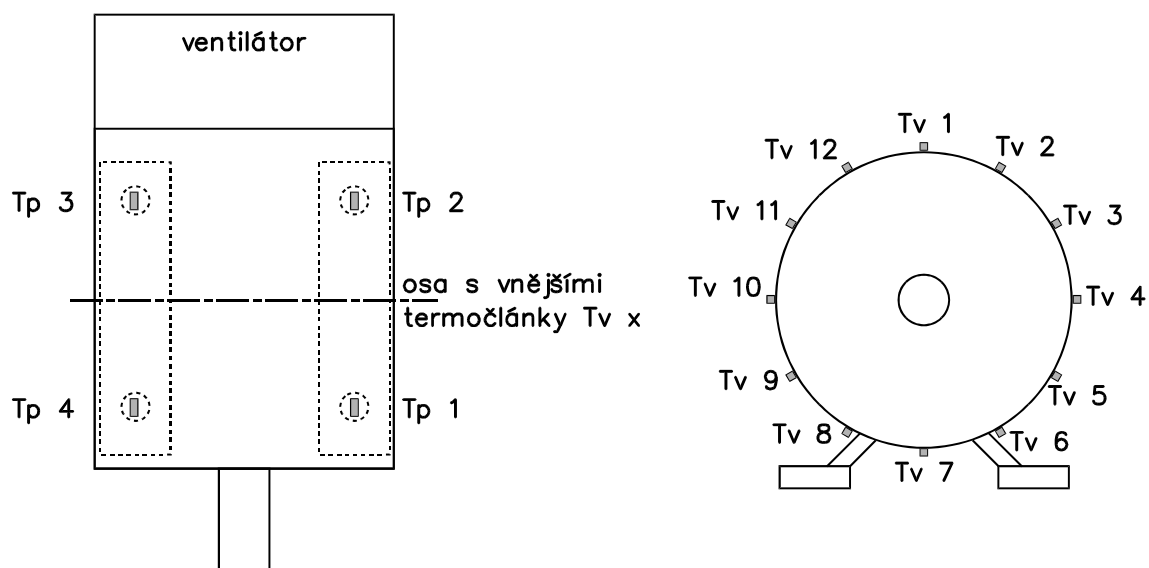
Obr. 3.2: Odbočky ve vinutí, číslo značí závit

### 3.5.1 Analyzátor Norma 5000 a proudové sondy HAMEG HZ56

Analyzátor od firmy LEM [16] je použit k měření odebíraných proudů a napětí. Měří jak proudy v jednotlivých fázích, tak i proud zkratovaným vinutím. Norma 5000 umožňuje připojit 4 proudové sondy, použity jsou HAMEG HZ56/HZ56-2 [17], proud je tak měřen nepřímou. Napětí se přivádí přímo pomocí běžných svorek. Lze využít jak manuální ovládání, tak i dálkové pomocí PC. Firma LEM dodává vlastní aplikaci k záznamu dat, jejíž uživatelské rozhraní je ekvivalentní k rozhraní v přístroji. Komunikace probíhá využitím síťového rozhraní Ethernet, avšak lze využít i USB–GPIB. Jistou nevýhodou je, že jak dodaný program, tak i Norma 5000 samotná neumožňuje nastavit zcela vlastní frekvenci snímání měřených veličin. Přístroj byl použit především díky možnosti záznamu dat a možnosti připojení 4 proudových sond.

### 3.5.2 Synchronní generátor MEZ

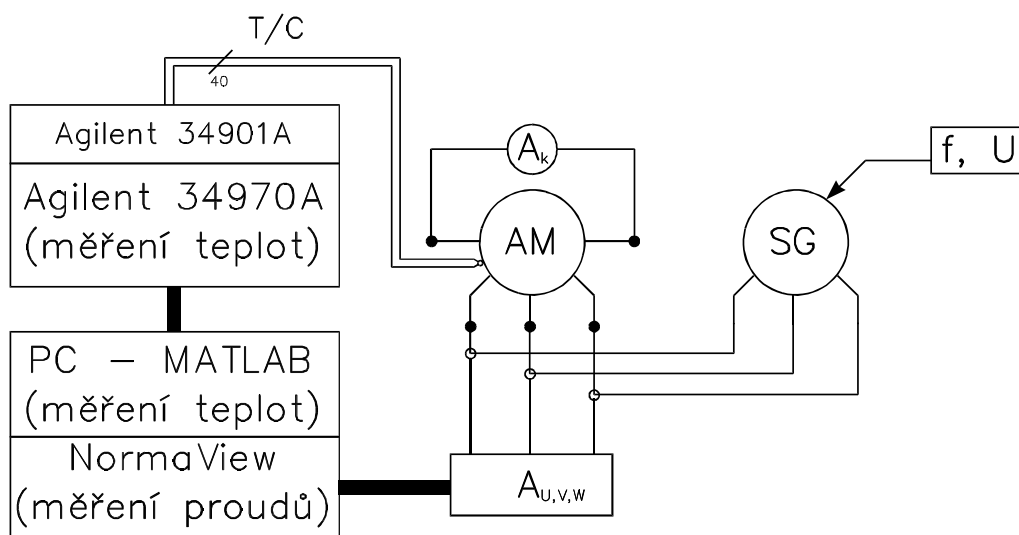
Soustrojí se synchronním generátorem slouží jako zdroj elektrické energie. Umožňuje volit frekvenci i velikost dodávaného napětí změnou buzení. Jde o třífázový zdroj, kterým byl měřený elektromotor napájen při všech experimentech. Parametry jsou uvedeny v tabulce 3.3. Buzení zajišťoval stejnosměrný zdroj HP 6030A [11].



Obr. 3.3: Umístění termočlánků na statoru a patkách AM

### 3.6 Blokové zapojení

Přístroje a stroje jsou ve finálním stavu zapojeny dle obrázku 3.4. Klíčovou částí je měřicí ústředna Agilent 34970A s 2 kartami 34901A se zapojenými 40 termočlánky a samozřejmě PC s Matlabem. Ostatní součásti nejsou nezbytně nutné, tedy měření fázových proudů a zkratového proudu přístrojem Norma.



Obr. 3.4: Blokové zapojení přístrojů,  $A_k$  – zkratový proud,  $A_{U,V,W}$  – fázové proudy



Tab. 3.2: Přehled termočlánků [12]

Typ T/C	(+) větev	(-) větev	Rozsah teplot	Přesnost
<b>B</b>	Pt - 30% Rh	Pt - 60% Rh	250 °C ÷ 1820 °C	±0,5 °C
<b>J</b>	Fe	Konstantan	-210 °C ÷ 1200 °C	±1,1 °C ÷ 2,2 °C
<b>K</b>	Ni - Cr	Ni - Al	-200 °C ÷ 1370 °C	±1,1 °C ÷ 2,2 °C
<b>T</b>	Cu	Konstantan	-200 °C ÷ 400 °C	±0,5 °C ÷ 1,0 °C
<b>E</b>	Ni - Cr	Konstantan	-200 °C ÷ 1000 °C	±1,0 °C ÷ 1,7 °C
<b>N</b>	Nicrosil	Nisil	-200 °C ÷ 1300 °C	±1,1 °C ÷ 2,2 °C
<b>R</b>	Pt - 13% Rh	Rh	-50 °C ÷ 1760 °C	±0,6 °C ÷ 1,5 °C
<b>S</b>	Pt - 10% Rh	Pt	-50 °C ÷ 1760 °C	±0,6 °C ÷ 1,5 °C

Tab. 3.3: Štítkové údaje generátoru

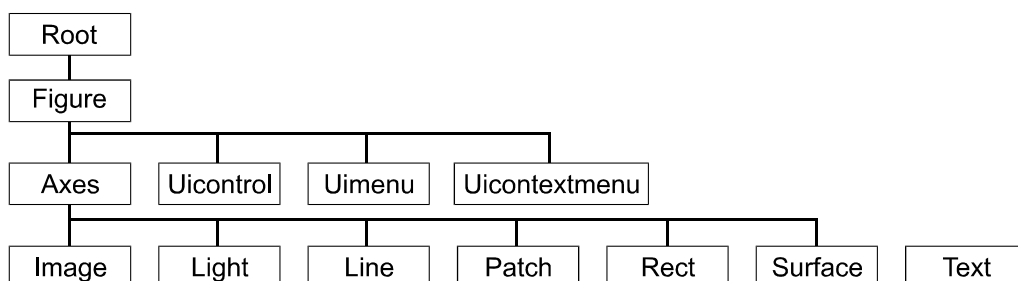
<b>Typ</b>	MEZ 1H36266 000
<b>Výkon</b>	16 kW/ 20 kVA
<b>Proud</b>	29 A (Y 400/230 V)
<b>Účíník</b>	0,8

## 4 Grafické uživatelské rozhraní v prostředí Matlab

K účelům měření teplot elektromotoru bylo nutno vytvořit aplikaci, protože ruční záznam několika stovek údajů není možný ani vhodný. Jako základní prostředí pro měření byl zvolen Matlab. Tento softwarový produkt poskytuje vše potřebné k získávání i zpracování dat. Jde především o přístup k datům pomocí matic a vektorů, možnost tvorby grafického uživatelského rozhraní a jsou k němu dostupné také knihovny k ovládání měřicích přístrojů. Není tedy nutné používat žádné externí programové vybavení.

### 4.1 Uživatelské rozhraní

Požadavek na aplikaci byl takový, že musí obsahovat grafické uživatelské rozhraní. To jednak usnadní práci uživatele při získávání dat, ale pomůže i k jejich zpracování a zobrazování. V Matlabu se k tvorbě grafických objektů využívá tzv. systém Handle Graphics. V [13] je uveden následující obrázek 4.1 s hierarchií objektů a také tabulkou dostupných prvků 4.2. Za základní prvek lze



Obr. 4.1: Hierarchie objektů v Matlabu [13]

považovat objekt `figure`, tedy okno. Zde se umísťují všechny ostatní objekty,

tak jak nastiňuje tabulka 4.2. Objekt **figure** se využívá velice často k základním účelům – tvorbě grafů. Jak uvádí [13] je možné přistoupit k tvorbě uživatelského rozhraní dvěma způsoby.

První, a pro mnohé uživatele jednodušší, je využít integrovaného návrháře GUI-IDE (Graphical User Interface Design Environment). Což je sice snadné pro designový návrh, avšak při následném definování funkcí, značně nepřehledné. Ve vygenerovaném kódu je totiž velmi problematické se orientovat, což autoři [13] potvrzují.

Druhou možností, v této práci využitou, je tzv. Switched Board Programming [13]. Z počátku je tato cesta obtížnější, avšak při použití této metody uživatel přesně ví, co zapsal do kódu, tudíž má i dokonalý přehled o něm. Principem je vytvoření jediné funkce, která volá sama sebe se vstupním parametrem. Vykonává tak různou část svého kódu. Proto se daným komponentám přiřadí tzv. **callback** – zpětnovazební kód. Po spuštění hlavní funkce se pomocí standardních příkazů **switch** a **case** vybere potřebný segment kódu k vykonání. Oba způsoby by však měly vést ke stejnému výsledku.

## 4.2 Grafický průvodce GUIDE

Návrhář GUIDE je dostupný pomocí menu Matlabu případně příkazem **guide**. Při spuštění je uživateli nabídnuta možnost vytvoření návrhu dle připravené šablony, např. menu s grafem. Nabídka je velmi podobná jiným programátorským prostředím. Jednak je to paleta s komponentami, kde je na výběr několik standardních voleb typu tlačítko, editační pole, posuvník atd. Druhou důležitou částí je tzv. Property inspector, který zpřístupňuje nastavení dané komponenty. Lze tak snadno měnit popisku, barvu, polohu a především zmíněný **callback**. Uživatel si vloží na plochu aplikace potřebné prvky a přiřadí funkční kód vykonávající potřebnou akci.

## 4.3 Tvorba GUI v prostředí Matlab manuálně

K tlačítkům, editačním polím a jiným objektům se přistupuje pomocí tzv. **handles** – rukojetím. Což je proměnná, která je interpretovaná jako datový typ **double**. Její hodnota skrývá veškeré vlastnosti ať už nastavené pomocí Property inspectoru nebo přímým přístupem, viz dále. Handle však není obecně globálně přístupná pro-

měnná, proto je ho nutné vyhledat před případnou změnou parametru. Autoři [13] doporučují využít k tomuto účelu parametr `tag`, který poslouží jako prostředník. Do této položky se uloží výstižná a jednoznačná popiska. Při požadavku změnit jakýkoliv parametr lze využít následující princip:

```
H=findobj('Tag','jmeno')
set(H,'parametr','hodnota').
```

Příkaz `findobj` vyhledá objekt s popiskou `jmeno`, díky uložení do proměnné `H` je zajištěna možnost následného přímého přístupu. Změna parametru se pak provádí pomocí příkazu `set` s výše uvedenou syntaxí.

Vytvoření tlačítek je nyní kompletně úkolem uživatele a to pomocí příkazu `uicontrol`. Syntaxe tohoto příkazu je [14] následující:

```
UICONTROL('PropertyName1',value1,'PropertyName2',value2,...).
```

Přehled prvků uvádí tabulka 4.1.

Tab. 4.1: Přehled grafických prvků [14]

Prvek	Popis
Radio button	Radio – přepínač.
Toggle button	Dvoustavové tlačítko.
Push button	Jednostavové tlačítko.
Check box	Zatržítka – přepínač.
Edit text	Editační pole.
Slider	Posuvník.
List box	Listovací menu.
Popup menu	Vyskakovací menu.
Axes	Vykreslování grafů a obrázků.
Figure	Okno – základní prvek.
Panel	Slouží k seskupení komponent.

## 4.4 Parametry objektů

Klíčové parametry budou obecně představeny v následujících řádcích. Vybrány jsou pouze ty, které je nutné definovat pro chod aplikace. Parametrů je mnohem více a jejich bližší specifikace je uvedena v nápovědě Matlabu [14].

### 4.4.1 Poloha

Důležitým parametrem komponenty je jistě poloha na ploše okna. Tu představují standardní hodnoty v ose  $x$  a  $y$  počítané od levého spodního rohu. Pokud se jedná o rozměry, tak Matlab umožňuje přístup jak absolutní, tak i relativní. Jednotkami mohou být centimetry, ale v této práci se využívalo běžnějších pixelů. Pokud nevyužijeme GUIDE jen k čistě vzhledovému návrhu aplikace, bude umisťování prvků naslepo značně problematické. Je proto vhodné si danou aplikaci předem rozvrhnout v GUIDE a využít pouze zobrazených hodnot polohy všech komponent. Drobné korekce lze již provádět ručně přímou editací kódu. Zdatnější uživatelé s dobrým odhadem jistě přeskočí krok s GUIDE.

### 4.4.2 Označení

Parametr **Tag** již byl zmíněn avšak je nutno podotknout, že účel identifikace prvku není jeho výsadou. Stejně tak by bylo možno použít např. parametr **UserData**. Pro nás daleko podstatnějším parametrem je **Callback**, neboli funkce zpětného volání. V tomto parametru se totiž definuje název funkce, která se vyvolá při dané události, tedy např. kliknutí na tlačítko. Pro SBP tak platí, že tímto jménem je sama funkce a další výstižný název definující úsek kódu, který bude spuštěn. O skok do správné části kódu se postará dvojice příkazů **switch** a **case**.

### 4.4.3 Typ prvku

Neméně důležité je definovat jaký druh prvku má být vytvořen. K tomu je potřeba definovat parametr **Style**. Tabulka 4.1 přibližuje možné volby vzhledu a tedy i zároveň funkčnosti. Takže pro běžně užívané tlačítko použijeme volbu **pushbutton**, či pro zatržítka volbu **checkbox**.

#### 4.4.4 Textová Popiska

Vhodné je také určit nějakou popisku daného prvku, k tomu slouží obvyklý parametr `String`. Dále je možno nastavovat a měnit mnoho dalších voleb. Ty však není nutné definovat pro samotné vytvoření komponenty v aplikaci. V případě, že chceme znát volby komponenty, můžeme využít příkazu `get(handle)`, Matlab následně vypíše všechny dostupné volby, které lze příkazem `set` změnit. Jde například o volby písma, jeho velikost, nastavení barvy, viditelnosti komponenty atd.

### 4.5 Realizace GUI ve formě funkce

Po představení nezbytných dílčích znalostí lze uvést jak se přistupuje k tvorbě celé „aplikace“. V podstatě jde o běžný `m-file`, tak jak jej známe z Matlabu. V jeho úvodu je definována funkce se vstupním parametrem. Následně je použit běžný podmínkový příkaz `if`, pomocí kterého je ošetřeno první spuštění funkce. To je moment, kdy žádný vstupní parametr není použit a využijeme ho k „tvorbě“ prostředí naší aplikace, tedy všech tlačítek, popisků, zatržítek a dalších. Po spuštění dosud uvedeného kódu bychom dostali nefunkční aplikaci. Je totiž nutno definovat zpětné volání `callback` pro žádanou komponentu. Zde se využije již několikrát zmíněná dvojice příkazů `switch` a `case`. Příkaz `switch` má totiž zadán stejný vstupní parametr jako hned na počátku uvedená definice funkce. Nyní po rozvětvení příkazy `case` vytvoříme jednotlivé úseky určené ke spuštění. Vše výše uvedené vystihuje tento zdrojový kód:

```
function Program (vstpar)
if nargin==0
    % prostor k definici komponent v aplikaci
else
switch (vstpar)
    case('stisk_tlacitka')
        % kód vyvolaný po stisknutí tlačítka
    case('konec')
        % kód vyvolaný po ukončení aplikace
```

Tab. 4.2: Hierarchie objektů včetně významů [13]

<b>Jméno grafického objektu</b>	<b>Význam grafického objektu</b>
Root	Vrchol hierarchie grafických objektů, odpovídá obrazovce počítače.
Figure	Okno, ve kterém se zobrazuje grafika a uživatelský interface.
Axes	Souřadný systém pro zobrazení grafů v okně Figure.
Uicontrol	Uživatelské grafické rozhraní, jež vykoná nějakou funkci jako reakci na zásah uživatele (např. stisk tlačítka a následná akce).
Uimenu	Uživatелеm definované menu v horní části okna.
Uicontextmenu	Klasické (pop-up) menu, využitelné kdekoliv v Root.
Image	2D bitmapový obrázek.
Light	Zdroj osvětlení obrázku Image.
Line	Objekt čáry, používaný při kreslení grafů.
Patch	Vyplněný polygon s hranami.
Rectangle	2D tvar s možností změny od čtvercového po oválný.
Surface	3D reprezentace maticových dat.
Text	Psaní textových řetězců v rámci definované grafiky.

## 5 Aplikace IMTfield

Aplikace vznikla při řešení této práce. Název je dán zkrácením z klíčových slov „Induction Motor Temperature field“, které vystihují použití. Tím je snadné ovládání a získávání dat ze zvolené ústředny pomocí prostředí Matlab. Je to tedy hlavní nástroj při měření teplotního pole asynchronního elektromotoru.

### 5.1 Požadavky, výhody a popis

Tato aplikace slouží k ovládání měřicí ústředny, shromažďování a vyhodnocení dat. Nejprve je nutno uvést jaké požadavky byly vzneseny. Jde o následující vlastnosti:

- grafické uživatelské rozhraní
- měření pomocí měřicí ústředny a termočlánků
- volba typu termočlánků
- nastavení a ověření komunikace GPIB
- parametry měření (počet/perioda)
- volba měřicích kanálů
- popiska měřicích kanálů a přiřazení k fázi
- zobrazení dat v grafu
- možnost filtrovat data v grafu
- načtení a uložení dat
- načtení a uložení parametrů měření



- funkce alarmu při překročení teploty

Následným vývojem byly všechny požadavky splněny a upřesněna jejich funkce. Na počátku nebylo pevně stanoveno v jakém prostředí bude aplikace vyvinuta. Z pohledu dalšího zpracování dat padla volba na zmíněný Matlab a jeho ne zcela běžně používané funkce grafického rozhraní. Výhody Matlabu jsou shrnuty v následujícím výčtu:

- výsledný kód je otevřený a pro běžného uživatele Matlabu snadno čitelný
- aplikace je multiplatformní (jako Matlab samotný)
- z předchozího vyplývá i možnost vlastních úprav „na míru“
- standardní práce s daty v podobě vektorů a matic
- standardní práce s grafy s již zavedenými funkcemi
- dostupné VISA knihovny pro práci s GPIB/SCPI

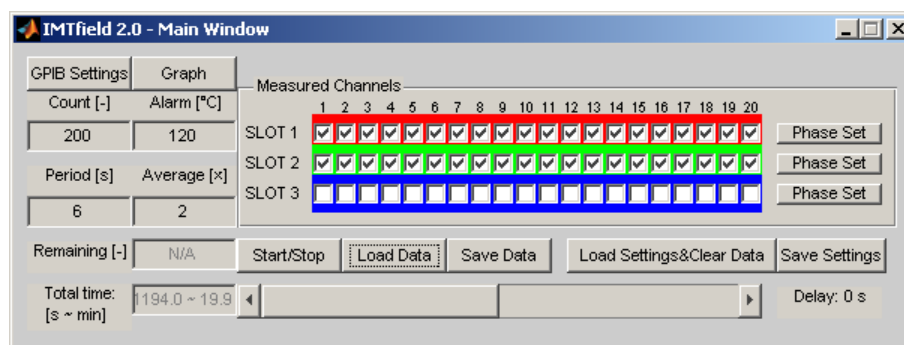
Aplikace byla navržena minimalisticky s ohledem na ovládání především pomocí myši. Tudíž nebylo použito běžné menu, i když Matlab jeho tvorbu umožňuje. Jazykem rozhraní byla zvolena angličtina a to především z důvodu kratších vyjádření a také komplikací s diakritikou u češtiny. Problém je způsoben zvoleným písmem, kdy Matlab implicitně používá západní sadu písma a následně nezobrazuje české znaky. Řešením je použít české fonty resp. označené koncovkou CE, tím by však zbytečně narůstal kód.

## **5.2 „Uživatelský manuál“**

Po přečtení této krátké podkapitoly by měl být uživatel schopen ovládat aplikaci IMTfield. Popsány jsou pouze základní funkce. Podrobnější popis je uveden v následující podkapitole s programovou strukturou.

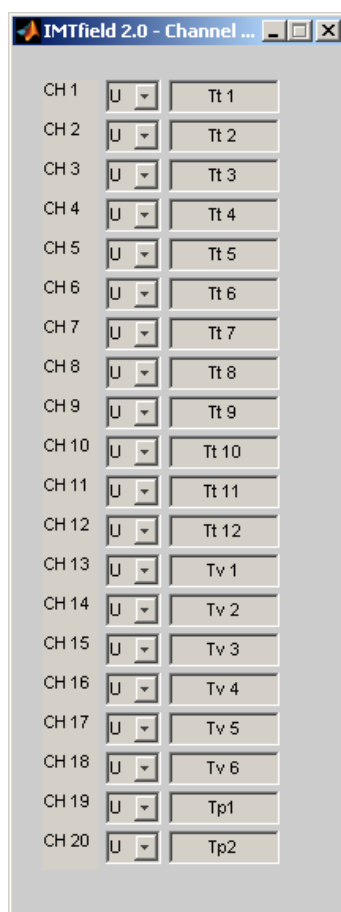
### **5.2.1 Základní práce s aplikací**

Základní okno programu působí velmi jednoduše, viz. obrázek 5.1. Obsahuje často používané funkce. Jde především o nastavení měřicích kanálů. Zde si uživatel



Obr. 5.1: Základní okno aplikace

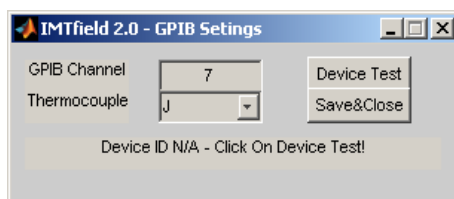
zaškrtně patřičná zatržítka, čímž zvolí měřené kanály. Poblíž je tlačítko **Phase Set**, kde lze přiřadit příslušnost kanálů k fázi a specifikovat popisku místo standardního názvu „Chan x“, kde x je číslo daného kanálu, obrázek 5.2. Příslušnost k fázi je



Obr. 5.2: Podrobnější konfigurace měřených kanálů

následně v hlavním okně rozlišena barvou: U – červená, V – zelená a W – modrá. Následuje nastavení komunikace GPIB dostupné přes tlačítko a umístěné v novém okně, kde je možné zvolit komunikační kanál a typ měřeného termočlánku, což uka-

zuje obrázek 5.3. Termočláanky lze volit ze skupiny J, E, K, B, N, R, S a T. Zároveň



Obr. 5.3: Nastavení komunikace GPIB a termočláanky

je možné prověřit komunikaci po sběrnici GPIB, kdy se odešle standardní dotaz na identifikaci připojeného zařízení. Pokud zařízení odpoví, je odpověď zobrazena v panelu. Dojde-li k chybě komunikace, je vypsána Matlabem standardní chybová hláška s upřesněním chyby.

Jsou zde i editační pole pro nastavení počtu měření a periodu měření. Editací pole **Alarm** umožňuje nastavit hodnotu teploty, při které bude uživatel vizuálně varován. Jde o změnu barvy pozadí celé aplikace na červenou a následuje výpis hodnot v hlavním okně Matlabu. Jisté specifikum je pole **Average**. To uvádí, kolikrát bude měření opakováno v rámci jedné periody, tím lze zvýšit přesnost měření. Tento počet měření bude průměrován a uložen. Následně jsou naměřené hodnoty teploty prověřeny, zda nepřekračují povolenou mez (teplotní alarm). Zde je nutné zohlednit možnosti použitých měřicích přístrojů. Měřicí karta vložená do měřicí ústředny totiž umožňuje měřit rychlostí 60 kanálů/sekundu. Periodu měření je pak nutné úměrně zvýšit podle počtu žádaných průměrů. Pokud si uživatel nepřeje měření opakovat neboli průměrovat, vloží do pole **Average** číslo 1. V poli **Remaining** je zobrazen počet zbývajících měření.

### 5.2.2 Ukládání a načítání dat

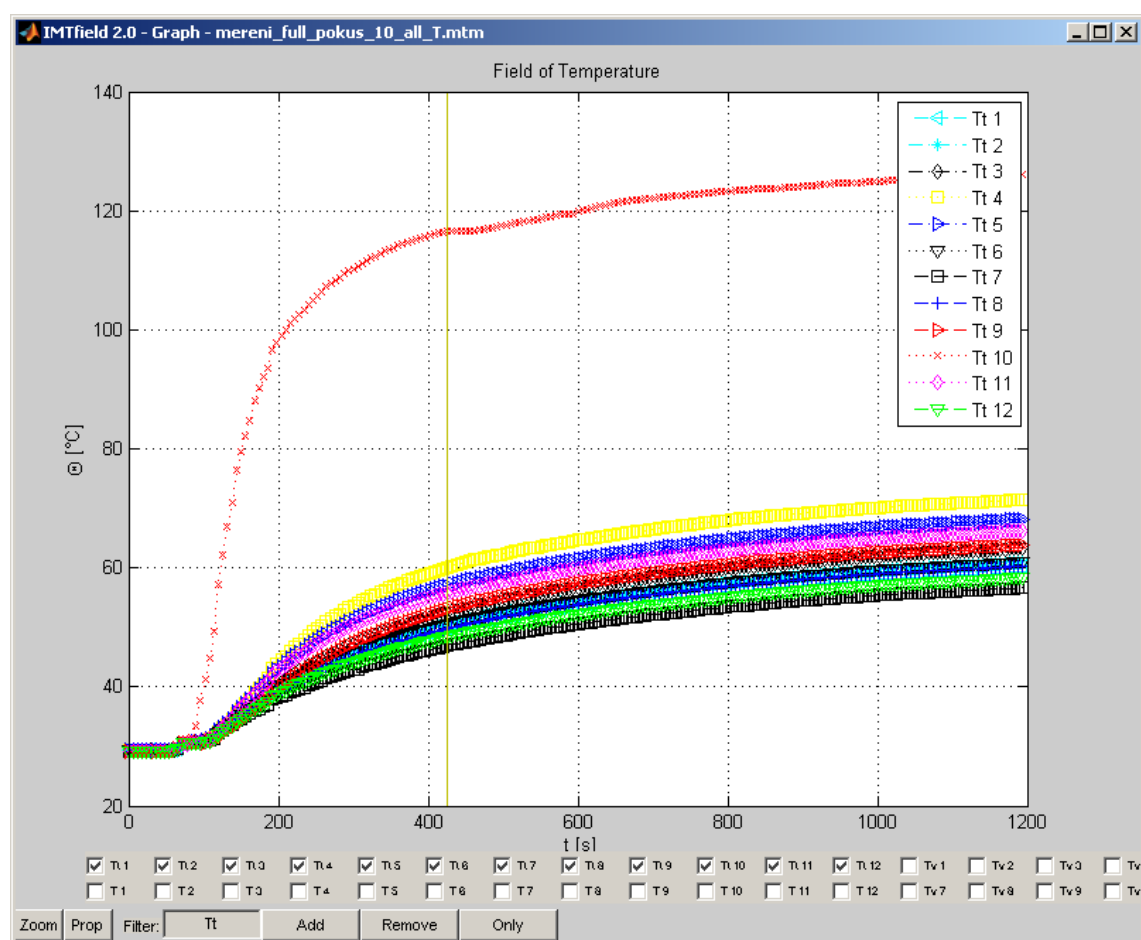
Uživateli je umožněno naměřená data uložit do souboru a samozřejmě je i načíst pomocí standardních open/save dialogů. Jako formát dat je použita binární forma běžně používaná v Matlabu tzv. MAT-file. Do tohoto souboru se uloží klíčové proměnné z pracovního prostředí tzv. Workspace, tedy hlavně matici **MERENI** a další. Soubor s naměřenými daty má implicitně příponu **MTM**. Uložit a načíst je vzhledem k počtu až 60 kanálů možné i nastavení, tedy zvolené kanály a jejich popisky. K uložení se používá opět MAT-file, přípona souboru je **MTS**.

### 5.2.3 Start měření

Spuštění měření je možné oddálit pomocí funkce **Delay** až o 10 sekund. Ke skutečnému odstartování měření dat se využívá sdružené tlačítko **Start/Stop**, které jak napovídá popiska lze využít i k manuálnímu zastavení. To je vhodné například při překročení mezní teploty alarmu, kdy už není potřeba dále měřit.

### 5.2.4 Vykreslení dat do grafu

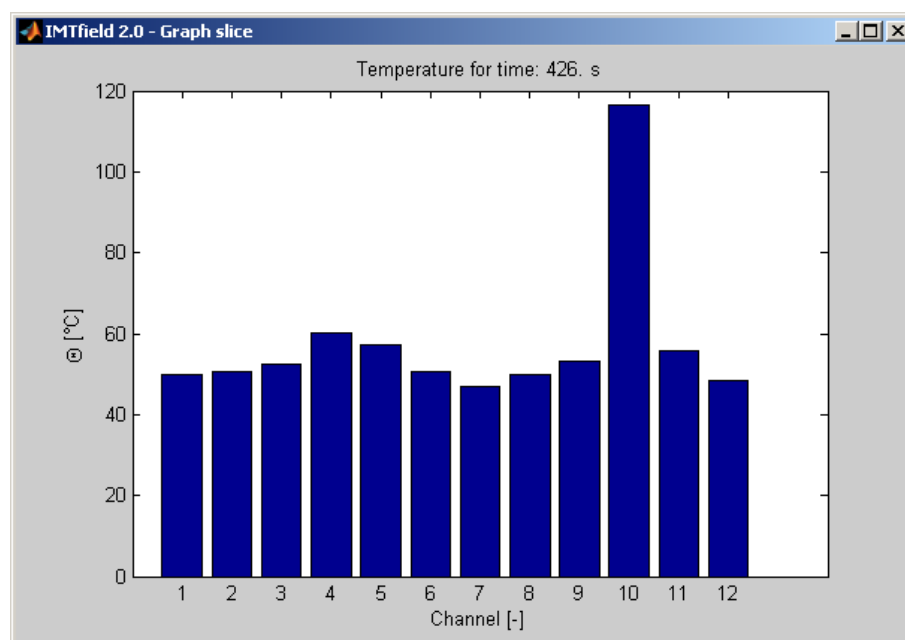
Po odměření jsou data uložena do dočasného souboru a především vykreslena do grafu, který je zobrazen v novém okně, viz. obrázek 5.4. Zde si uživatel může zvolit



Obr. 5.4: Vykreslení naměřených hodnot do grafu

pomocí zatržitek, které kanály budou vykresleny. Stejného výsledku jde docílit i pomocí filtrování, ovšem naráz. Je však nutné, aby názvy kanálů obsahovaly společné znaky. Filtr se aktivuje tlačítkem **Add** a následně se dané kanály skryjí. Deaktivování filtru se provádí analogicky pomocí **Remove**. Tlačítko **Only** vykreslí pouze zvolené kanály. K dispozici je i funkce zvětšení dostupná pod tlačítkem **Zoom**. Běžné editační

nástroje Matlabu jsou standardně skryty, ovšem lze je zpřístupnit pomocí tlačítka Prop. Následně je možné graf libovolně upravovat, exportovat či tisknout. Kliknutím do prostoru grafu se provede „řez“ v čase a vykreslí do nového grafu, to zobrazuje obrázek 5.5. Pro zvolený čas se zobrazí přehledný sloupkový graf s vybranými kanály a jejich teplotami.



Obr. 5.5: Řez grafu pro daný čas

## 5.3 Programová struktura aplikace IMTfield

Jak aplikace vnitřně funguje je popsáno v této podkapitole. Je zde také více přiblížena funkce jednotlivých bloků a především uvedeno, která část zdrojového kódu daný problém řeší. Zdrojový kód aplikace je v elektronické podobě v příloze na CD.

### 5.3.1 Přístup k řešení

Aplikace je řešena jako funkce, které se běžně v Matlabu používají. Jde tedy o tzv. M-file. Na počátku tohoto souboru je definice funkce pomocí příkazu `function`. Tato funkce má zadaný jeden vstupní parametr, přes který se určí vykonávaný segment kódu. Při prvním spuštění je třeba provést základní nastavení a připravit uživatelské rozhraní. Inicializují se tak základní parametry měření – počet měření

a perioda měření. Základní počet měření je nastaven na 3 a perioda na 2 sekundy. GPIB komunikace je nastavena na kanál 7 a použitý typ termočlánku na J. Dále jsou vytvořeny proměnné, které jsou využité při generování grafického rozhraní, jde o šířku a výšku tlačítek, velikosti oken atd.

Naměřená data se ukládají do matice nazvané **MERENI**, tu je však nutno předem připravit. Matice má nastaven počet sloupců na 60, tedy tolik, kolik může být měřeno kanálů měřicí ústřednou s vloženými třemi měřicími kartami. Na prvním řádku této matice je číslo kanálu. Na druhém řádku je logická hodnota 0 nebo 1 podle toho, zda je daný kanál měřen. Třetí řádek obsahuje číslo 1, 2 nebo 3, toto číslo značí příslušnost k měřené fázi U, V nebo W. Ostatní řádky obsahují již měřená data. Aplikace umožňuje pro lepší orientaci v grafech pojmenovat jednotlivé kanály. Tyto popisky jsou ukládány do matice složené z tzv. buněk (cell), matice je opět připravována v této části kódu. Jsou do ní zapsány standardní názvy v podobě „Chan (číslo kanálu)“. Dále je nutno při prvním spuštění vytvořit jednotlivé grafické prvky, tedy okna, tlačítka, editační pole a další. Obecný princip byl již popsán. Zbytek kódu aplikace řeší jednotlivé události vyvolané ať už kliknutím, či spuštěním samotného měření. Tyto části jsou uvozeny příkazem **case** spolu s výstižným názvem události. Jejich pořadí tak nemá žádný vliv na funkci. Části kódu, u kterých je funkce intuitivně jasná, zde nebudou blíže popisovány.

### 5.3.2 Uložení a otevření nastavení aplikace

Tyto dvě funkce jsou řešeny v sekcích **set\_save** a **set\_load**.

Uložení využívá standardní funkce Matlabu **uiputfile**, která poskytuje běžné dialogové okno pro uložení. Tímto jsou předány název souboru a adresář. Následně je využito funkce **save**, která uloží zadané proměnné do binárního souboru typu MAT. Uloženy jsou matice **TEXTY** s popisky a první tři řádky matice **MERENI**, ty obsahují nastavení.

Otevření souboru analogicky využívá funkcí **uigetfile** a **load**. Navíc je nutno obnovit stav všech zatržitek v hlavním okně a příslušnost fázi, která je v hlavním okně indikována červenou, zelenou nebo modrou barvu pro fáze U, V a W.

### 5.3.3 Uložení a otevření naměřených dat

Funkce uložení a načtení jsou definovány v sekcích `win_load` a `win_save`.

Princip je stejný jako u ukládání resp. načítání nastavení, kde jsou použity stejné funkce. Ukládány jsou matice `MERENI`, `CAS_MERENI` a `TEXTY` opět do binárního souboru.

V případě otevření souboru je nutné vykonat specifické úkony typu obnovení časové osy pro vykreslení grafu. Dále je potřeba aktualizovat stav všech dotčených grafických prvků ve všech použitých oknech. Ať už jde o editační pole či zatržítka, tedy stejně jako při načtení nastavení. Úkon je to téměř identický, pracuje se totiž se stejnými maticemi, navíc však jsou obsažena data.

### 5.3.4 Nastavení měřených kanálů Phase Set

Stiskem jednoho ze tří tlačítek **Phase Set** je volána sekce `win_chanset`. Aby nebylo nutné vytvářet sekci pro každé tlačítko zvlášť, je použita globální proměnná `aktivni`, přes kterou je určeno právě aktivní tlačítko. To je také využito k určení handle zatržitek a editačních polí. Dále je aktualizován popisek a volba fáze. Volba příslušnosti k fázi je řešena pomocí vysouvacího menu. Sekce reagující na událost vysouvacího menu je ve zdrojovém kódu nazvána `win_chan`. Nabídka má položky jednak indexované od 1, zde tedy 1 až 3, a dále jsou k nim přiřazeny slovní popisky U, V či W. Po výběru dané položky je uložena volba do matice `MERENI` na řádek 3 k příslušnému kanálu/sloupci a také je změněna barva zatržítka v hlavním okně aplikace, podobně jako při načtení nastavení ze souboru (červená, zelená, modrá).

### 5.3.5 Nastavení komunikace GPIB

Okno s nastavením GPIB se objeví po vyvolání události v sekci `win_gplibset`, tedy stiskem patřičného tlačítka. V tomto dialogu je možné zvolit kanál GPIB, je však nutné uživatele zkontrolovat, zda do editačního pole zadal platnou numerickou hodnotu, to řeší funkce `isnumeric`. Kontrola je v sekci `win_gplibset_test_input`. Je zde proveden i příkaz k uložení tohoto kanálu i typu termočlánku do globálních proměnných `GPIB_SET_CH` a `GPIB_SET_TC`. Po nastavení je možné ověřit spojení mezi PC a měřicí ústřednou stiskem tlačítka **Device test**. To vyvolá sekci `win_gplibset_device_test`, kde je do zařízení odeslán příkaz `*IDN?` a pokud přijde

odpověď, která obsahuje název v podobě zařízení, je zobrazena na panelu v okně.

### 5.3.6 Kontrola vložených údajů uživatelem

Aplikace umožňuje měnit uživateli různá numerická nastavení, např. periodu měření. Vloženou hodnotu je nutné zkontrolovat, zda je numerického typu, to se děje pomocí funkce `isnumeric`. Pro tento účel je vytvořena jedna společná sekce `win_test_input`, která naráz kontroluje více editačních polí než jen právě použité.

### 5.3.7 Graf naměřených hodnot

Sekce se jménem `graf` zajišťuje vykreslování hodnot pomocí funkce `plot` do okna `Graph`. Z důvodu velkého množství vykreslovaných křivek je nutné zajistit jejich správné rozlišení. Na začátku spuštění aplikace jsou proto náhodně rozlosovány tři vektory o délce 60 prvků, každý kanál by tak měl být s jistou pravděpodobností jednoznačný. Vektory jsou uloženy v matici `znacky` a každý obsahuje pouze omezenou množinu čísel dle možností funkce `plot`, např. pro možnosti barvy je losováno z celých čísel 1 až 7, barev je tedy použito 7. Tato čísla jsou využita k volbě typu značky, barvy křivky i jejího typu. Problematickou se jeví legenda, ta bohužel může přesahovat oblast grafu. Je to způsobeno již zmíněným množstvím dat, Matlab patrně není na toto připraven.

Pro zjednodušení práce s rozsáhlým grafem je zapracována možnost „vypínání“ křivek, což je řešeno v sekci `graf_chkbox` a `graph_enable / disable`. První možnost v podobě zatržítka umožní uživateli vypnout určitý jednotlivý kanál. Graf je následně překreslen již bez zvoleného kanálu. K vypnutí více kanálů naráz je možné využít jakýsi filtr. Je však nutné si předem kanály pojmenovat tak, aby měly společný text, např. T 1, T 2 atd. Zadáním výrazu „T“ a stiskem tlačítka `Add` se filtr aktivuje a vypnou se všechny kanály vyhovující vloženému výrazu. Deaktivace se provádí stiskem `Remove`. Zde se vyskytl poměrně zajímavý problém s použitím regulárních výrazů. Matlab totiž neumožňuje jejich aplikaci přímo na název, v tomto případě to jsou zatržítka a jejich vlastnost `String`. Avšak lze je užít na tzv. `Tool tip string`, což se zdá poměrně nepochopitelné, protože obě tyto vlastnosti jsou typu `string`. Co vedlo tvůrce Matlabu k tomuto podivnému řešení není jasné.

Uživateli je také umožněna jednoduchá editace grafu tak, jak ji umožňuje sa-



motný Matlab. Jde o funkci změny měřítka, což řeší sekce `graph_zoom` a plnou editaci v sekci `graph_prop`. První pouze zapne funkci `zoom` pomocí přepínače. Je-li přepínač v základní poloze, funkce není přístupná. Ta se aktivuje teprve po stisku tlačítka. Druhá volba pod tlačítkem `Prop.` zapne editační mód (zapne se příslušná nástrojová lišta) a je tak možné měnit v podstatě vše od legendy po typ čáry, či měnit barvy.

Stav, kdy je funkce zvětšení vypnutá, lze využít k tzv. řezu grafem, což je sekce `gra_slice`. Po kliknutí do prostoru grafu se získá souřadnice osy  $x$  pomocí vlastnosti `CurrentPoint`, z které je určen čas řezu. V okně s časovým průběhem se doplní pro názornost svislá linka značící, v jakém čase byl řez proveden. Následně se otevře nové okno se sloupcovým grafem. Do tohoto grafu jsou vykresleny všechny měřené kanály vztahující se k danému času.

### 5.3.8 Spuštění a zastavení měření

Tlačítko `Start/Stop` spouští případně zastavuje měření. To je řešeno v `startstop` sekci. Pokud měření neběží, je spuštěna sekce `mereni`, jinak je změněn stav proměnné `prerus` na 1, tím je dán pokyn měřicí smyčce k ukončení.

### 5.3.9 Hlavní měřicí smyčka

Tato smyčka je v sekci `mereni`. Uživateli je nutno zablokovat přístup k většině tlačítek či editačním polím v hlavním okně, aby nezavedl aplikaci do chybného stavu. Poté jsou uzavřeny dosavadní okna mimo hlavního a odstraněna stará naměřená data z matice `MERENI`. Do matice jsou zapsány na patřičné pozice jedničky indikující zapnutý kanál z aktuálního stavu zatržitek v hlavním okně. Je to nutné provést z důvodu vícenásobného využití těchto dat, kde by si je uživatel mohl nechtěně změnit, např. vypnutím kanálu v grafu.

Funkce časového zpoždění spuštění měření tzv. `delay` využívá jednoduché smyčky `for` a příkazu `pause`. Posuvníkem se mění doba pauzy. V každém průchodu smyčky je aktualizována číselná hodnota v popisce s časem a změněna pozice posuvníku. Na počátku je poloha posuvníku změněna na nulovou pozici a posuvník se přemisťuje do cíleného místa.

Na řadu dále přichází inicializace komunikace GPIB, použijí se při tom vložené

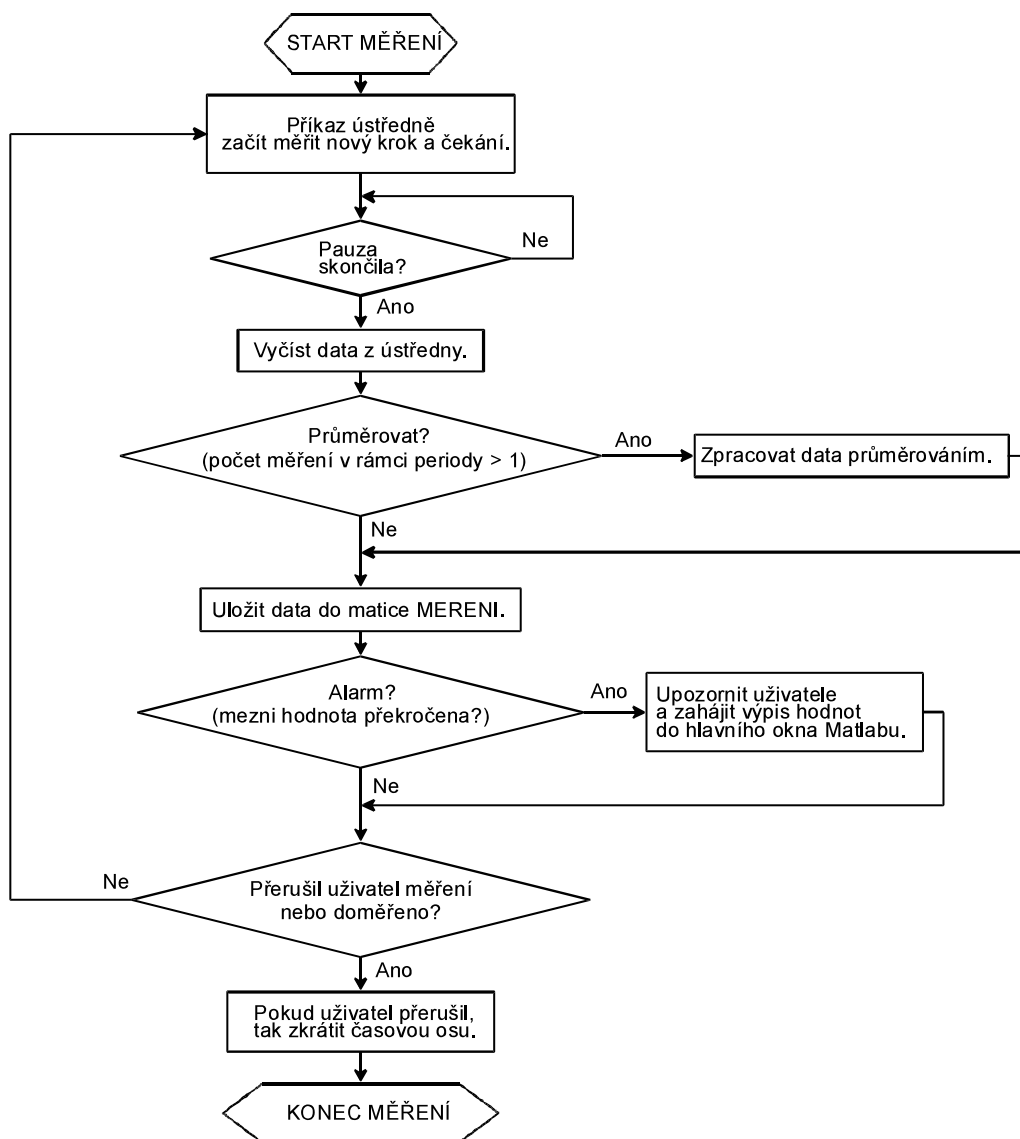
hodnoty uživatelem. Kvůli čtení dat je také nutné zvětšit hodnotu `InputBufferSize`, která má standardně velikost 512 B, do této hodnoty by se vešlo pouze 32 hodnot poslaných z měřicí ústředny.

K zajištění jasného stavu je měřicí ústředna uvedena do továrního nastavení příkazy `*RST` a `*CLS`. K měření je nutno vytvořit tzv. `scanlist` podle uživatelem zvolených kanálů a získat typ termočlánek z patřičné proměnné. Nastavení se provede příkazem `CONF:TEMP TCouple, J, (@201, 202)` kde `TEMP` udává měření teploty, `TCouple` značí termočlánek, písmeno `J` jeho typ a za znakem `@` jsou uvedeny měřené kanály. Spouštění měření tedy tzv. `trigger` je nastaven následující dvojicí příkazů `TRIG:TIMER MIN` a `TRIG:SOURCE TIMER`. Bude se tedy měřit podle času a v minimálních časových odstupech. Podle počtu průměrování je následně voleno množství naměřených dat příkazem `TRIG:COUNT počet`.

Nyní je již možné měření odstartovat pomocí `INIT`. Periodu měření je nutné obstarat ručně pomocí příkazu `pause`. Pokud by nedocházelo k průměrování a tedy vícenásobnému měření, byla by schopna měřicí ústředna tuto pauzu v měření dělat sama. Stiskne-li uživatel zastavovací tlačítko, je měřicí smyčka zkrácena a následně i ukončena. Je však nutné přizpůsobit časovou osu, aby došlo ke korektnímu zpracování funkce `plot` při vykreslování do grafu, nesouhlasila by délka vektorů. Po odměření se ústředně zašle příkaz `FETCH?`, po tom již stačí vyčíst naměřená data standardním `fscanf` a patřičně naformátovat pomocí `sscanf(ans, ['\%f', ',', ','])`.

Tím jsou data shromážděna, ale nejsou průměrována ani uložena v měřicí matici `MERENI`. Proto jsou nyní z jednoho jediného sloupce rozdělaný na více sloupců dle průměrování. Na takto připravená data je již možné aplikovat funkci `mean` (aritmetický průměr), která data zprůměruje.

Ještě zbývá data správně uložit do matice `MERENI`, při kterém jsou kontrolována, zda nepřekročila stanovenou mez, tedy `alarm`. Po doměření jsou data vykreslena do grafu, komunikace s měřicí ústřednou ukončena a odblokováno uživatelské rozhraní. Výše uvedené zobrazuje obrázek 5.6.



Obr. 5.6: Vývojový diagram měřicí smyčky

## 6 Měření teplotního pole AM

Pomocí pracoviště bylo provedeno ověřovací měření teplotního pole elektromotoru, vzhledem k tomu, že jde pouze o otestování funkčnosti, byly měřeny jen teploty a nikoliv odebírané proudy či zkratový proud.

Pro tento účel bylo zvoleno následující zadání. Změřit teplotní profily pro frekvence 10, 20, 30, 40 a 50 Hz a to bez zkratu, elektromotor byl napájen SG a nebyl zatížen. Jako druhé byl měřen stejný AM pro 30 Hz a to pro dva simulované zkraty mezi U10–N a W5–N, tedy fáze U – závit č. 10 a uzlem – středním vodičem N, analogicky druhý zkrat.

### 6.1 Naměřené hodnoty

Pro každé měření bylo získáno 40 teplot různě rozmístěných jak vně elektromotoru, tak i ve vinutí, doba všech měření byla v řádu hodin, při teplotách přibližně 20 °C. Vzhledem k tomuto vysokému počtu bylo do grafů vybráno vždy 8 podstatných křivek. Naměřené hodnoty jsou v příloze B.

### 6.2 Zhodnocení

Ze všech uvedených grafů je jasné vidět, že jsou rozděleny na několik oblastí. Nejvyšších teplot se dosahuje přímo ve vinutí, což je prvních pěti grafech 1 až 5 (příloha B) vyznačeno modrými křivkami. Následují o něco nižší vnější teploty označené červeně. Nejnižších teplot se dosahuje na patkách AM.

Na grafech uvedených v příloze, lze dále nalézt několik zajímavých jevů. Na počátku ohřevu AM teplota vinutí stoupá avšak teploty vně statoru a na patkách klesají. Dále jde o lehké kmitání při ohřevu elektromotoru a ustanutí tohoto jevu po vypnutí – ochlazování. To by mohlo být způsobeno rušením, protože úměrně

s teplotou roste i její rozkmit, což je dobře patrné na obrázku 1 v příloze B. K určení zdroje tohoto parazitního jevu by mohl pomoci frekvenční měnič či jiný zdroj elektrické energie než právě použitý.

Při ochlazování je jasně viditelný přesun tepla – vyrovnávání, mezi vinutím a vnějškem elektromotoru, kdy křivky vnitřních teplot klesají, zatímco vnější teploty rostou.

K zásadnímu nárůstu teplot dojde v momentě zkratu ve vinutí, nejmenší možné zkraty jsou uvedeny na obrázcích 6 a 7 v příloze B. Při zkratu U10–N naroste teplota až na přibližně 110 °C a to AM není zatížen, po té by již jistě došlo k překročení mezí teploty 140 °C uvedené výrobcem [4].

# Závěr

V rámci této diplomové práce se podařilo připravit pracoviště pro měření teplotního pole asynchronního elektromotoru. Byla také ověřena jeho funkčnost na několika pokusných měřeních.

Prvotním úkolem bylo vybrat vhodné měřicí přístroje pro budoucí pracoviště. Výběr padl na měřicí ústřednu a k ní dostupné měřicí karty obojí od firmy Agilent. Použité karty umožňují měřit teplotu pomocí termočlánků typu J, což jsou termočlánky vhodné pro měřený rozsah jak na povrchu statoru, tak i ve vinutí AM. Základní prvek pracoviště je ovšem speciálně vyvinutý elektromotor. Jeho příprava již probíhala dříve v diplomovém projektu, na který tato diplomová práce navazuje. Výroby tohoto elektromotoru se zhostila firma Siemens elektromotory s.r.o. Šlo především o vložení zmíněných termočlánků do vinutí a také vytvoření odboček z vinutí nezbytných k simulaci zkratů.

Vznikla také aplikace v prostředí Matlab, která zajišťuje snadné ovládání měřících přístrojů a umožňuje rychlý náhled jak právě naměřených dat, tak uložených. Automatizace měření je v tomto případě nezbytná, doby měření se pohybují v řádech hodin. Ovládat takový celek, jakým je vytvořené pracoviště, manuálně by bylo téměř nemožné a především značně neefektivní.

Na pracovišti je nyní možné provádět mnoho pokusů a měření, které dále prohloubí a rozvinou diagnostiku elektromotoru pomocí jeho vnější teploty. K čemuž je možné využít i další elektromotory. Již nyní je připraven další elektromotor s výkonem 7,5 kW. Na tomto bude zajímavé sledovat, jak rozmanité elektrické stroje co do chování jsou a lze očekávat další zajímavé výsledky.

Pracoviště tak splnilo požadavky kladené při měření teplotního pole asynchronního elektromotoru. Mezi výhody lze zmínit snadné ovládání pomocí PC či univerzálnost. Ta je dána prostředím Matlab, v kterém byla vyvinuta aplikace IMTfield. Kdokoliv znalý fungování Matlabu si tak může aplikaci specificky přizpůsobit a ne-

musí jít nutně o rozsáhlé měření teplotního pole se 40 měřenými body. Jistou nevýhodou lze spatřit v interpretovaném jazyce Matlabu, což se trochu negativně projevuje v rychlosti vykreslování prostředí aplikace, není to však na úkor funkčnosti.

Lze doufat, že vytvořené pracoviště bude nápomocné vývoji nového typu diagnostiky AM, pomůže této metodě v prosazení do praxe a ve výsledku ušetří finanční prostředky.

# Literatura

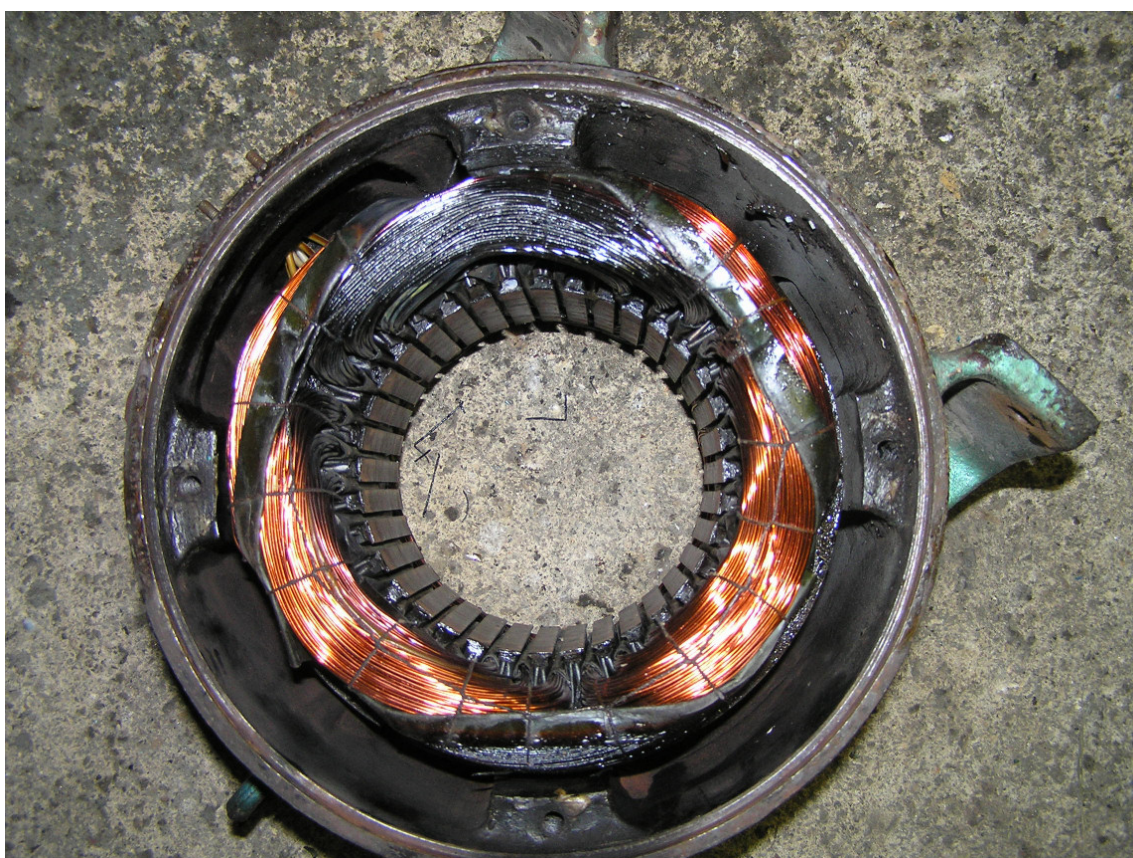
- [1] MRAVEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje : III. Navrhování elektrických strojů točivých*. 1975. vyd. Praha : SNTL, 1986. 237 s.
- [2] ČSN EN 60034-11 (35 0000) Točivé elektrické stroje. Praha : Vydavatelství norem, 1991. 16 s.
- [3] PAVELKA, Jiří, ČEŘOVSKÝ, Zdeněk, JAVŮREK, Jiří. *Elektrické pohony*. 2001. vyd. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2001. 222 s.
- [4] *Siemens* [online]. [2009] [cit. 2009-04-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.siemens.com>>.
- [5] *Elektrodesign : FAQ* [online]. 2003 , 5.5.2006 [cit. 2009-04-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.elektrodesign.cz>>.
- [6] *ABB* [online]. [2009] [cit. 2009-04-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.abb.com>>.
- [7] KNOTEK, Jaroslav. *Navíjení a převíjení asynchronních elektromotorků*. 2. dopl. vyd. Praha : 1970, 1970. 315 s.
- [8] BERAN, Leoš. *Analýza zkratového proudu a jeho tepelného účinku v malých asynchronních motorech*. Liberec, 2007. 120 s. Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky. Vedoucí dizertační práce Aleš Richter.
- [9] BEZDÍČEK, Jan. Diagnostika asynchronních motorů. *Automa*. 2004, č. 3, s. 44-47.
- [10] *Comet* [online]. [2009] [cit. 2009-04-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.cometsystem.cz>>.



- [11] *Agilent* [online]. c2009 [cit. 2009-04-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.agilent.com>>.
- [12] *User's guide : Agilent 34970A*. Loveland : Agilent Technologies, Inc., 2006. 436 s. Dostupný z WWW: <<http://www.agilent.com>>.
- [13] ZAPLATÍLEK, Karel, DOŇAR, Bohuslav. *Matlab : tvorba uživatelských aplikací*. 2005. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2005. 216 s. ISBN 80-7300-133-0.
- [14] *MATLAB Help*.
- [15] *Moeller* [online]. c2009 [cit. 2009-04-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.moeller.cz>>.
- [16] *Fluke (odprodej-LEM)* [online]. c2009 [cit. 2009-04-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.fluke.com>>.
- [17] *Hameg* [online]. c2009 [cit. 2009-04-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.hameg.com>>.
- [18] RYBIČKA, Jiří. *L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X pro začátečníky*. 3. vyd. Brno : Konvoj, 2003. 238 s. ISBN 80-7302-049-1.

# Přílohy

## A. Fotografie poruch elektromotorů



Obr. 1: Zkrat na jedné fázi





Obr. 2: Kontakt rotoru a statoru 1



Obr. 3: Kontakt rotoru a statoru 2





Obr. 4: Chod na dvě fáze



Obr. 5: Vadný ložiskový štít





Obr. 6: Přetížení 1

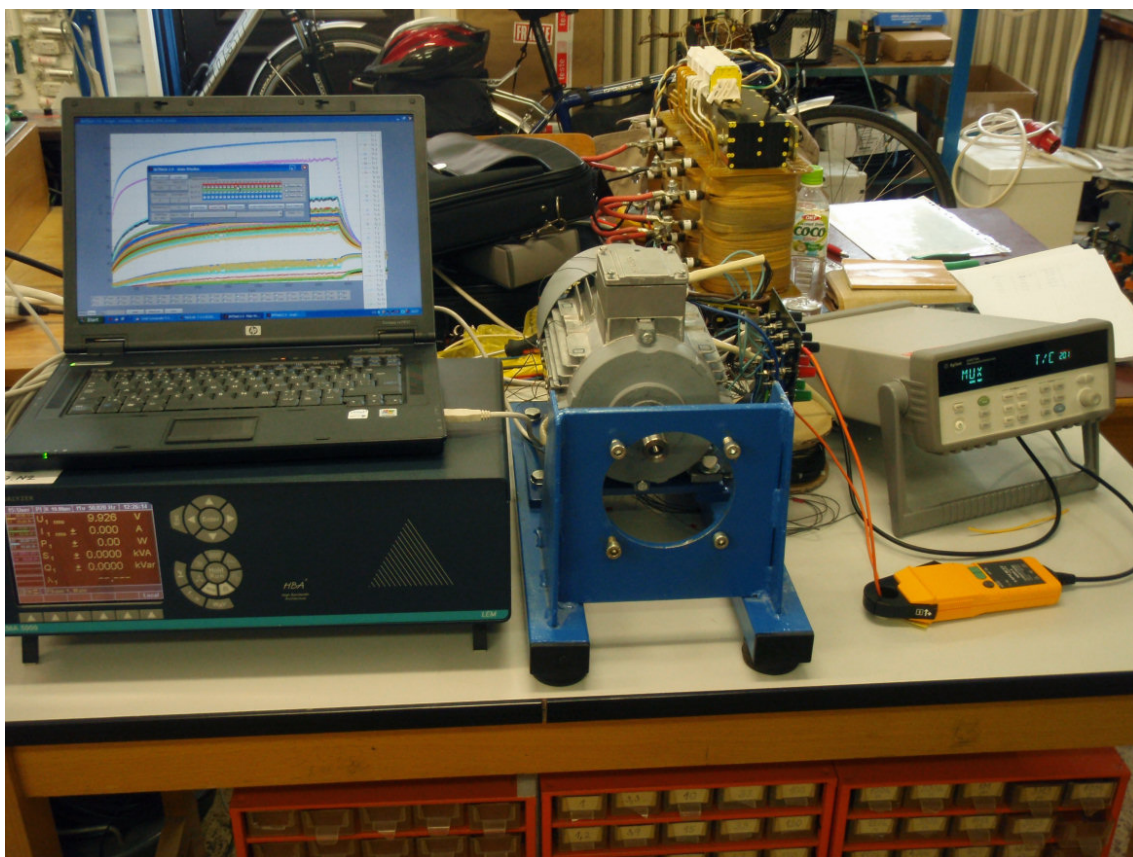


Obr. 7: Přetížení 2





Obr. 8: Přetížení 3



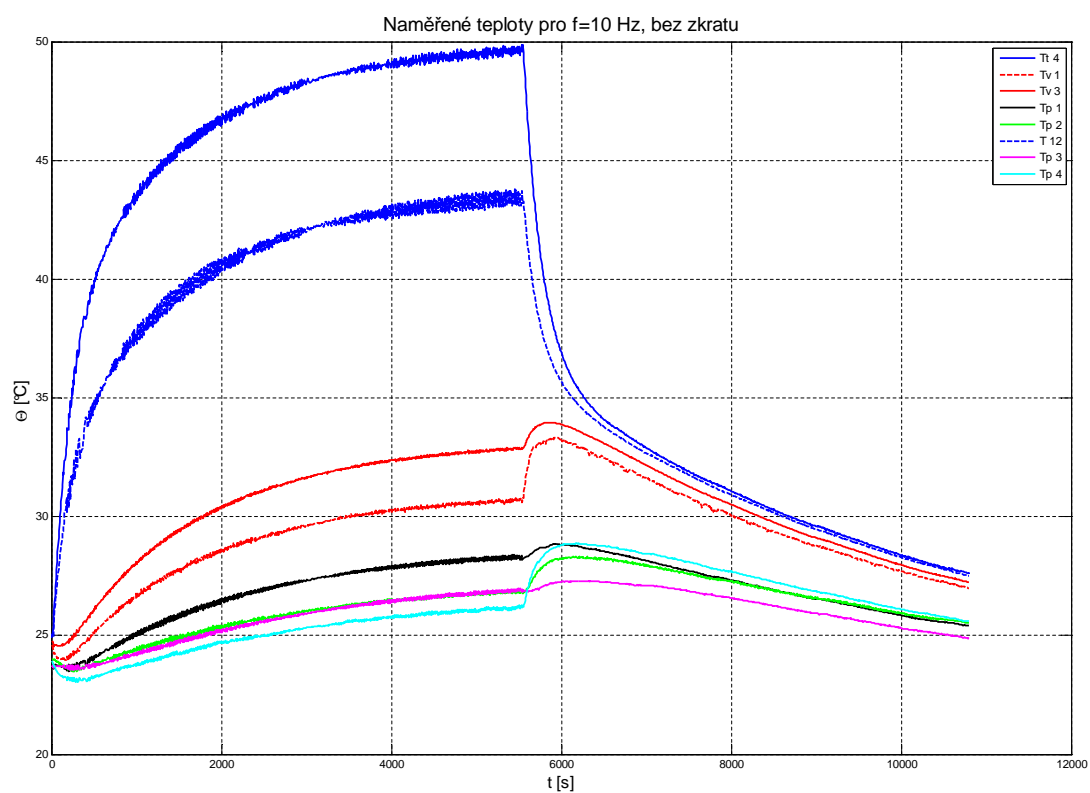
Obr. 9: Pracoviště 1





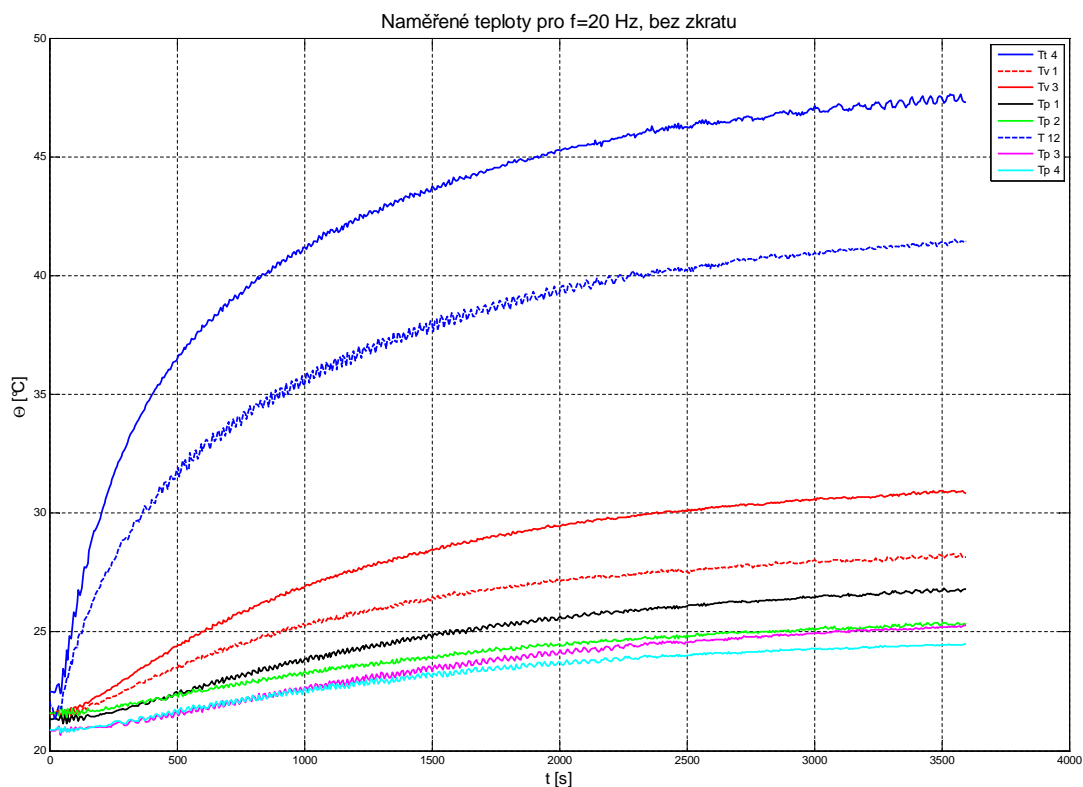
Obr. 10: Pracoviště 2

## B. Naměřené hodnoty

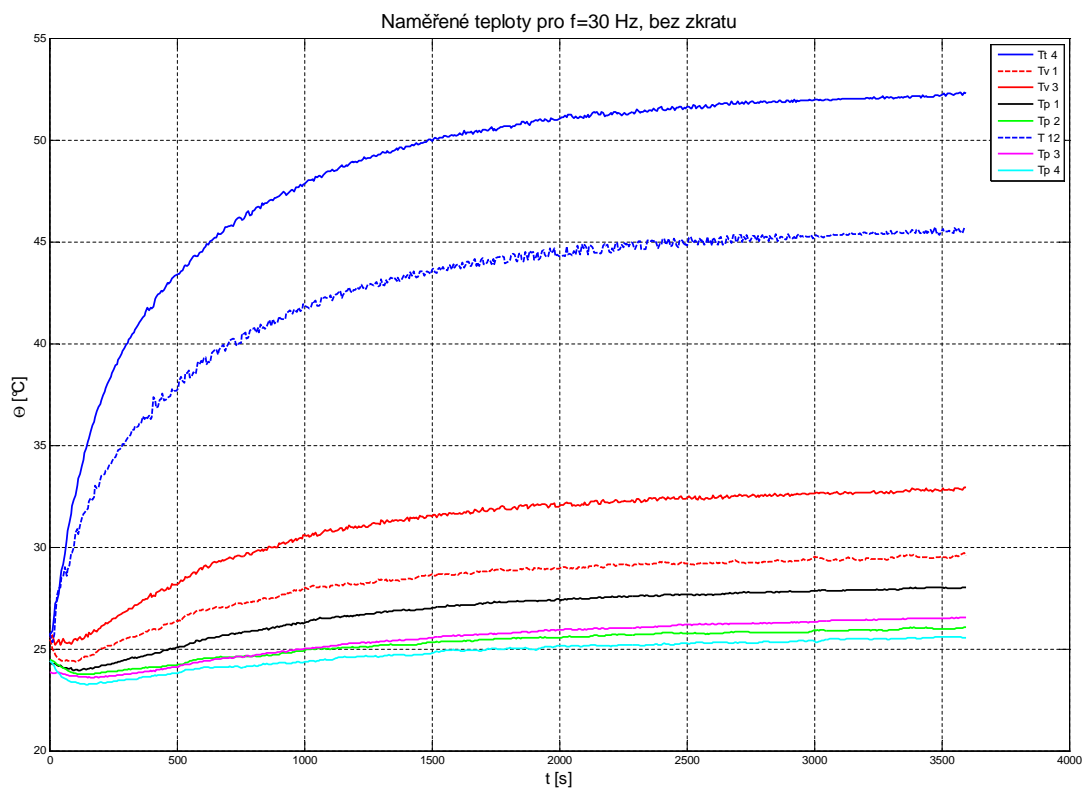


Obr. 1: Vysv.: modrá-vnitřní teploty (max/min), červená-vnější teploty (max/min)

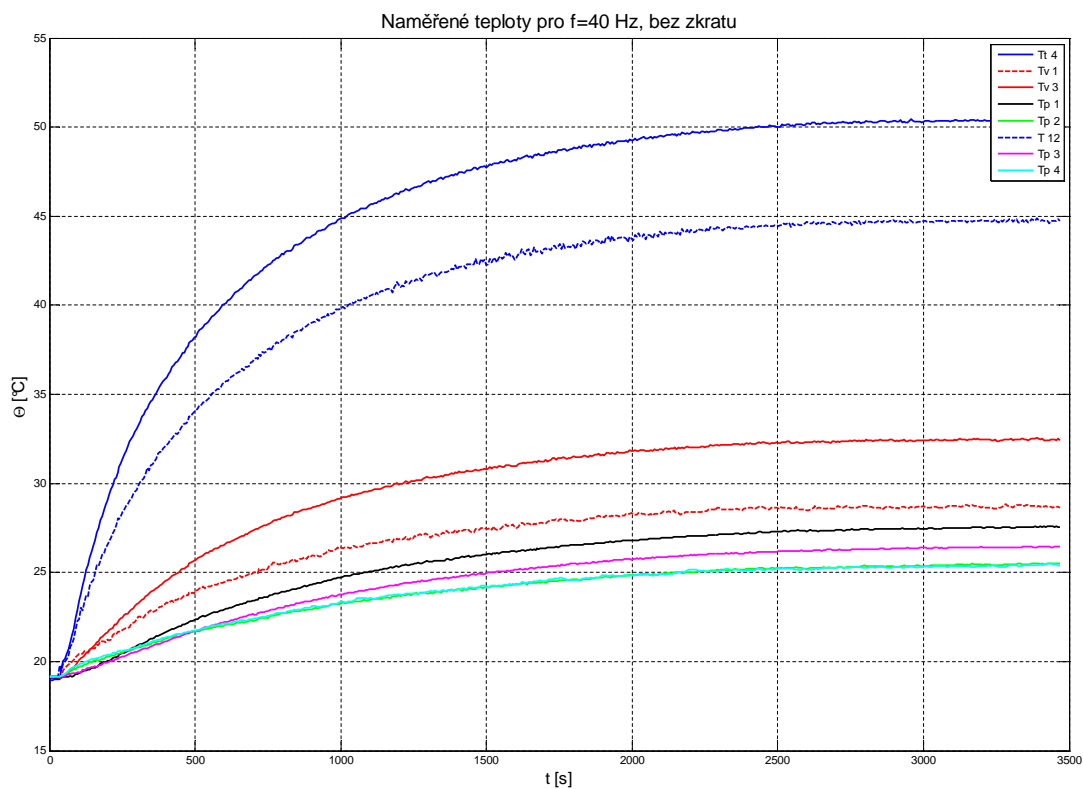




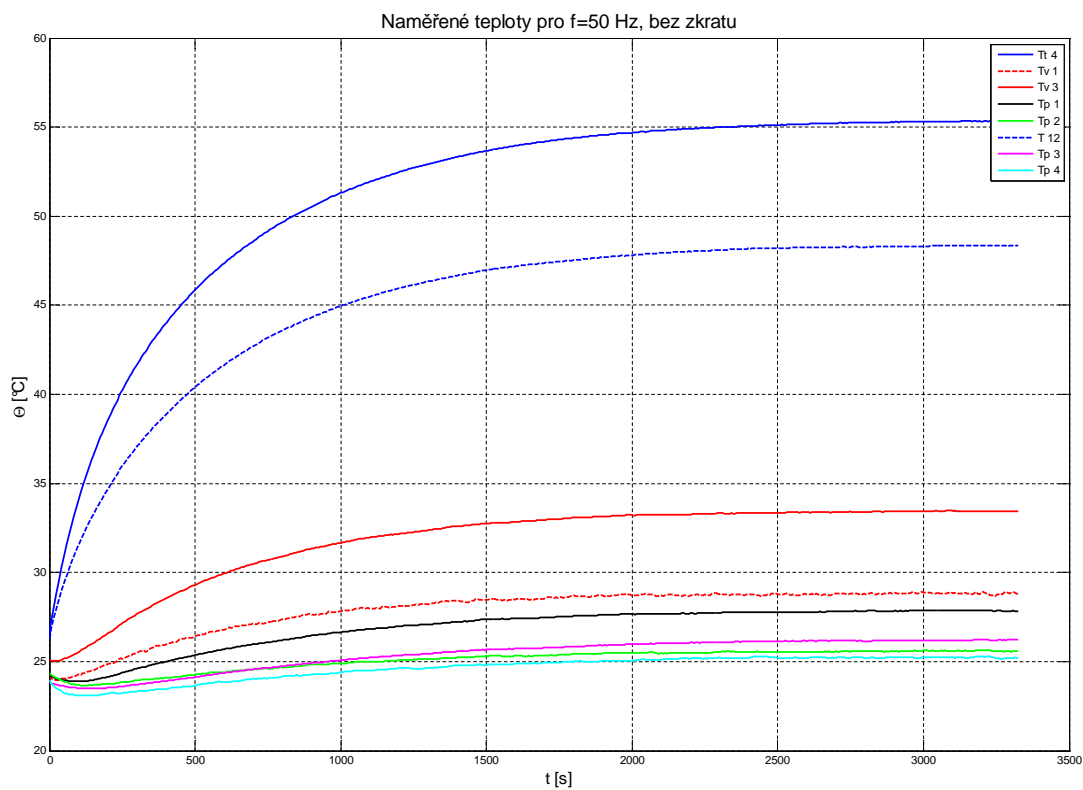
Obr. 2: Vysv.: modrá-vnitřní teploty (max/min), červená-vnější teploty (max/min)



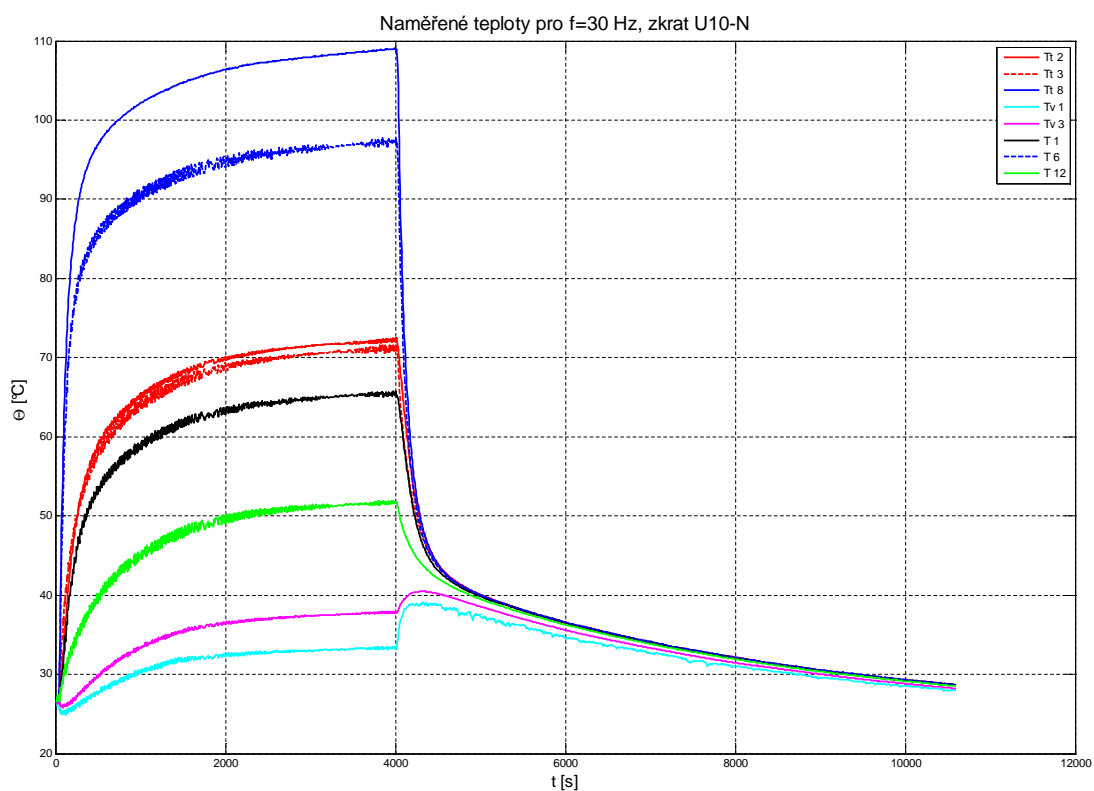
Obr. 3: Vysv.: modrá-vnitřní teploty (max/min), červená-vnější teploty (max/min)



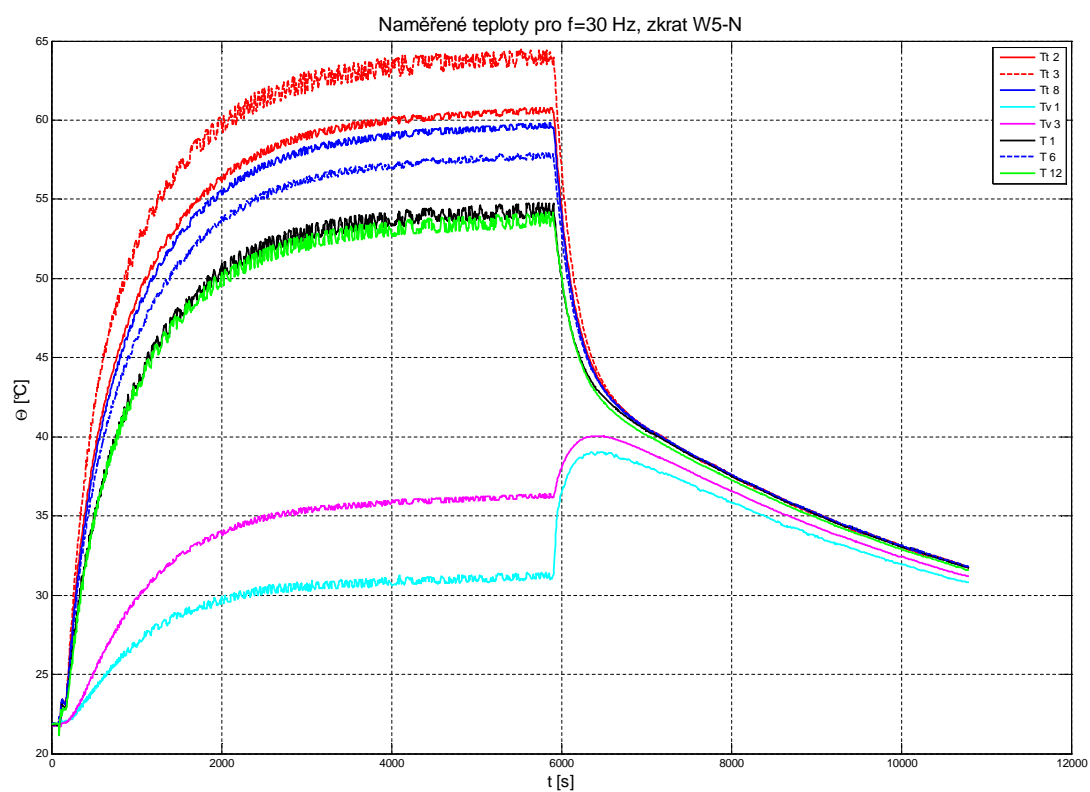
Obr. 4: Vysv.: modrá-vnitřní teploty (max/min), červená-vnější teploty (max/min)



Obr. 5: Vysv.: modrá-vnitřní teploty (max/min), červená-vnější teploty (max/min)



Obr. 6: Vysv.: modrá, červená - teploty poblíž zkratu U10-N



Obr. 7: Vysv.: modrá, červená - teploty poblíž zkratu W5-N